

Sveučilište u Zagrebu

**Fakultet strojarstva i brodogradnje**

# **DIPLOMSKI RAD**

Maroje Ćus

Zagreb, 2011.

Sveučilište u Zagrebu

**Fakultet strojarstva i brodogradnje**

# **DIPLOMSKI RAD**

Voditelj rada:  
prof.dr.sc. Janoš Kodvanj  
Ante Bakić, dr.sc.

Maroje Ćus

Zagreb, 2011.

## Sažetak

Vanjska fiksacija je operacijsko liječenje prijeloma dugih kostiju primjenom klinova ili žica u i kroz kost koji se učvršćuju za vanjsku konstrukciju. U mirnodopskoj, a posebno u ratnoj traumatologiji vanjski fiksatori se koriste za što jednostavniju, dužu i stabilnu fiksaciju što se posebno odnosi na politraumatizirane bolesnike.

U ovom radu prikazani su rezultati ispitivanja stabilnosti vanjskog fiksatora tvrtke *Orthofix* eksperimentalno na statičkoj kidalici i računalnom simulacijom u programskom paketu *Abaqus*, te rezultati nove konstrukcije vanjskog fiksatora dobiveni računalnom simulacijom. Svrha istraživanja je da se provjeri da li nova konstrukcija koja je jednostavnija za korištenje i manjih gabaritnih dimenzija, barem iste krutosti kao postojeća konstrukcija vanjskog fiksatora *Orthofix*. Dobiveni rezultati pokazuju kako nova konstrukcija u usporedbi s ispitanim fiksatorom nema zadovoljavajuću krutost, te su nužne konstrukcijske izmjene na nekim dijelovima kao što su vrat kugle zgloba te nosač vijaka. Te izmjene će kod većih opterećenja smanjiti pojavu lokalnih maksimalnih naprezanja koja su kod postojeće konstrukcijske izvedbe veća od dopuštenih, što će znatno smanjiti opasnost od loma i povećati krutost konstrukcije, a neće imati negativan utjecaj na funkcionalne zahtjeve brze i jednostavne montaže i osiguranja dostatne stabilnosti koštanih ulomaka.

Ključne riječi: vanjska fiksacija, krutost konstrukcije, računalna simulacija, optički mjerni sustav, pomaci

# Sadržaj

1. Uvod.....	1
1.1 Povijest vanjskog fiksatora .....	2
1.2 Vanjski fiksator .....	3
1.3 Statički vlačni pokus .....	6
1.4 Metoda konačnih elemenata .....	9
1.4.1 3D konačni elementi .....	9
1.4.2 Osnovni tetraedarski element.....	11
1.4.3 Tetraedarski elementi višeg reda .....	11
1.5 Programski paket Abaqus .....	12
1.6 Optički mjerni sustav <i>Aramis</i> .....	14
1.6.1 Mjerni postupak sa sustavom <i>Aramis</i> .....	15
2. Način predbe i svrha istraživanja .....	16
3. Eksperimentalno ispitivanje stabilnosti vanjskog fiksatora.....	17
3.1 Mjerenje pomaka pri aksijalnom opterećenju vanjskog fiksatora <i>Orthofix</i> .....	23
3.2 Mjerenje pomaka pri savijanju vanjskog fiksatora <i>Orthofix</i> .....	25
3.3 Obrada slike i dobivanje rezultata.....	26
4. Simulacija aksijalnog i savojnog opterećenja .....	28
4.1 Priprema modela <i>Orthofix</i> za simulaciju aksijalnog opterećenja .....	29
4.2 Priprema modela nove konstrukcije vanjskog fiksatora za simulaciju aksijalnog opterećenja .....	32
4.3 Priprema modela <i>Orthofix</i> za simulaciju savijanja .....	33
4.4 Priprema modela nove konstrukcije vanjskog fiksatora za simulaciju savijanja.....	35
5. Rezultati dobiveni provedbom eksperimenta i simulacije modela .....	36
5.1 Rezultati eksperimenta aksijalnog opterećenja vanjskog fiksatora <i>Orthofix</i> .....	36
5.2 Rezultati eksperimenta savijanja vanjskog fiksatora <i>Orthofix</i> .....	39
5.3 Rezultati dobiveni simulacijom aksijalnog opterećenja vanjskog fiksatora <i>Orthofix</i> .....	41
5.4 Rezultati dobiveni simulacijom savijanja vanjskog fiksatora <i>Orthofix</i> .....	45
5.5 Rezultati dobiveni simulacijom aksijalnog opterećenja nove konstrukcije vanjskog fiksatora.....	47
5.6 Rezultati dobiveni simulacijom savijanja nove konstrukcije vanjskog fiksatora .....	50
6. Zaključak.....	53
7. Literatura.....	54

## Popis slika

Slika 1.1 Vrste okvira vanjskog fiksatora .....	5
Slika 1.2 Unilateralni fiksator u jednoj ravlini s dvostrukom šipkom [7].....	5
Slika 1.3 Unilateralni fiksator u dvije ravnine (delta ili V-oblik okvira) [8].....	6
Slika 1.4 Dijagram kidanja $F-\Delta L$ .....	6
Slika 1.5 Dijagram naprezanje-istezanje $\sigma-\varepsilon$ .....	8
Slika 1.6 Često korišteni 3D elementi [11] .....	10
Slika 1.7 Osnovni tetraedarski konačni element [10] .....	11
Slika 1.8 Tetraedarski element drugog reda [10].....	11
Slika 1.9 Osnovni tipovi konačnih elemenata u programskom paketu <i>Abaqus</i> [11].....	13
Slika 1.10 <i>Aramis</i> optički mjerni sustav.....	14
Slika 1.11 Stohastični uzorak na mjernom objektu – „raster“ [14].....	15
Slika 2.1 Shema plana istraživanja.....	16
Slika 3.1 Uzorci rastera za određene mjerne površine [14].....	17
Slika 3.2 Vanjski fiksator <i>Orthofix</i> u čeljustima statičke kidalice postavljen za eksperiment aksijalnog opterećenja.....	18
Slika 3.3 Kalibriranje <i>Aramis</i> sustava.....	18
Slika 3.4 Kalibracijski objekt.....	19
Slika 3.5 Parametri koji ovise o potrebnom mjernom volumenu [15].....	19
Slika 3.6 Parametri sa kojima je potrebno namjestiti sustav u ovisnosti o potrebnom mjernom volumenu [15].....	20
Slika 3.7 Shematska ilustracija 4 osnovna načina opterećenja sustava kost-fiksator .....	21
Slika 3.8 Vijci za kosti [16].....	21
Slika 3.9 Epruvete za provedbu eksperimenta od polietilena, PE100 .....	22
Slika 3.10 Vanjski fiksator <i>Orthofix</i> pripremljen za provedbu eksperimenta aksijalnog opterećenja.....	23
Slika 3.11 Rezultati snimljenog eksperimenta aksijalnog opterećenja .....	23
Slika 3.12 Vanjski fiksator <i>Orthofix</i> pripremljen za provedbu eksperimenta savijanja.....	25
Slika 3.13 Rezultati snimljenog eksperimenta savijanja.....	25
Slika 3.14 Područje faseta (a) i dvije susjedne fasete (b) [14].....	26
Slika 3.15 Epipolarna ravnina [17].....	27
Slika 3.16 Mreža faseta koje opisuju geometriju snimanog modela vanjskog fiksatora <i>Orthofix</i> opterećenog na savijanje .....	27
Slika 4.1 Eksperiment aksijalnog opterećivanje modela [20].....	28
Slika 4.2 Eksperiment savijanja modela [20].....	28
Slika 4.3 Primjer dijagrama $\sigma-\varepsilon$ aluminijsa AlCu5BiPb-T8 za dobivanje podataka o plastičnim i elastičnim mehaničkim svojstvima .....	29
Slika 4.4 Postavljanje kontakata u modelu za simulaciju aksijalnog opterećenja.....	30
Slika 4.5 Aksijalno opterećen sklop (a) i uklještenje modela (b).....	30
Slika 4.6 Heksaedarski konačni elementi (a) i tetraedarski konačni elementi (b) .....	31

Slika 4.7 Mreža konačnih elemenata generirana na modelu za simulaciju aksijalnog opterećenja vanjskog fiksatora <i>Orthofix</i> .....	31
Slika 4.8 Rubni uvjeti i opterećenje modela nove konstrukcije vanjskog fiksatora.....	32
Slika 4.9 Vijak modela nove konstrukcije vanjskog fiksatora – tetraedarska mreža drugog reda.....	32
Slika 4.10 Mreža konačnih elemenata pripremljena za simulaciju aksijalnog opterećenje nove konstrukcije vanjskog fiksatora.....	33
Slika 4.11 Model <i>Orthofix</i> pripremljen za simulaciju savijanja.....	33
Slika 4.12 Rubni uvjeti, uklještenje i opterećenje modela <i>Orthofix</i> pripremljenog za simulaciju savijanja.....	34
Slika 4.13 Mreža konačnih elemenata pripremljena za simulaciju savijanja za model <i>Orthofix</i> .....	34
Slika 4.14 Priprema modela nove konstrukcije vanjskog fiksatora.....	35
Slika 4.15 Mreža konačnih elemenata modela nove konstrukcije vanjskog fiksatora.....	35
Slika 5.1 Ukupni pomaci vanjskog fiksatora <i>Orthofix</i> djelovanjem aksijalnog opterećenja .....	36
Slika 5.2 Ukupni pomak gornje epruvete pri aksijalnom opterećenju vanjskog fiksatora <i>Orthofix</i> .....	37
Slika 5.3 Pomak gornje epruvete u smjeru y-osi pri aksijalnom opterećenju vanjskog fiksatora <i>Orthofix</i> .....	37
Slika 5.4 Promjena razmaka između donje i gornje epruvete pri aksijalnom opterećenju vanjskog fiksatora <i>Orthofix</i> .....	38
Slika 5.5 Pomaci vanjskog fiksatora <i>Orthofix</i> pri aksijalnom opterećenju od 1000 N s prikazanim fasetama.....	38
Slika 5.6 Rezultat snimanja savijanja vanjskog fiksatora <i>Orthofix</i> pri maksimalnom opterećenju od 250 N.....	39
Slika 5.7 Pomak epruveta prema vanjskom fiksatoru <i>Orthofix</i> za eksperiment savijanja kod maksimalnih 250 N.....	39
Slika 5.8 Ukupni pomak točke na lijevoj epruveti vanjskog fiksatora <i>Orthofix</i> za eksperiment savijanja do maksimalnih 250 N.....	40
Slika 5.9 Pomak točke u smjeru y-osi na lijevoj epruveti vanjskog fiksatora <i>Orthofix</i> za eksperiment savijanja do maksimalnih 250 N.....	40
Slika 5.10 Ukupni pomak donje epruvete vanjskog fiksatora <i>Orthofix</i> opterećenog aksijalno silom od 1000 N.....	41
Slika 5.11 Ukupni pomak mjerenih točaka na gornjoj i donjoj epruveti vanjskog fiksatora <i>Orthofix</i> opterećenog aksijalno silom do 1000 N.....	41
Slika 5.12 Promjena ukupnih pomaka mjerenih točki na epruvetama vanjskog fiksatora <i>Orthofix</i> za aksijalno opterećenje silom do 1000 N.....	42
Slika 5.13 Pomak mjerene točke gornje i donje epruvete vanjskog fiksatora <i>Orthofix</i> za aksijalno opterećenje do 1000 N.....	43

Slika 5.14 Naprezanja kugle vanjskog fiksatora Orthofix opterećenog aksijalno silom od 1000 N .....	43
Slika 5.15 Pravilan odabir vanjskog fiksatora prema vrsti ozlijede i masi pacijenta [21] .....	44
Slika 5.16 Ukupni pomaci vanjskog fiksatora Orthofix za savojno opterećenje silom od 200 N .....	45
Slika 5.17 Ukupni pomak točaka na epruvetama vanjskog fiksatora <i>Orthofix</i> za savojno opterećenje silom do 200 N .....	45
Slika 5.18 Pomak mjerenih točki na epruvetama vanjskog fiksatora <i>Orthofix</i> uzduž osi y pri savojnom opterećenju silom do 200 N .....	46
Slika 5.19 Ekvivalentna naprezanja po <i>Misesu</i> vijaka vanjskog fiksatora <i>Orthofix</i> opterećenog na savijanje silom od 200 N .....	46
Slika 5.20 Ukupni pomaci (lijevo) te pomaci uzduž z-osi (desno) nove konstrukcije vanjskog fiksatora opterećene aksijalno silom od 1000 N .....	47
Slika 5.21 Ukupni pomak mjerenih točaka na epruvetama nove konstrukcije vanjskog fiksatora opterećenog aksijalno silom do 1000 N .....	47
Slika 5.22 Pomak mjerenih točaka na epruvetama nove konstrukcije vanjskog fiksatora u smjeru odi z pri aksijalnom opterećenju do 1000 N .....	48
Slika 5.23 Ukupna promjena udaljenosti epruveta nove konstrukcije vanjskog fiksatora pri aksijalnom opterećenju do 1000 N .....	48
Slika 5.24 Ekvivalentna naprezanja po <i>Misesu</i> nove konstrukcije vanjskog fiksatora opterećenog aksijalno silom od 1000 N .....	49
Slika 5.25 Ukupni pomaci (lijevo) te pomaci uzduž x-osi (desno) nove konstrukcije vanjskog fiksatora opterećene na savijanje silom od 200 N .....	50
Slika 5.26 Ukupni pomak mjerenih točaka na epruvetama nove konstrukcije vanjskog fiksatora za savojno opterećenje silom do 200 N .....	50
Slika 5.27 Pomaci točaka na epruvetama nove konstrukcije vanjskog fiksatora za savojno opterećenje silom do 200 N .....	51
Slika 5.28 Ekvivalentna naprezanja po <i>misesu</i> na vratu kugle zgloba nove konstrukcije vanjskog fiksatora opterećene savojno silom od 200 N .....	51

## **Popis tablica**

Tablica 1 Prikaz svih rezultata dobivenih eksperimentalno i računalnom simulacijom.....	52
---	----



## Popis oznaka

$E$	[N/mm <sup>2</sup> ]	- modul elastičnosti
$F_e$	[N]	- sila tečenja (razvlačenja)
$F_k$	[N]	- sila pri kojoj puca epruveta
$F_m$	[N]	- maksimalna sila
$L_0$	[mm]	- početna mjerna duljine epruvete
$R_e$	[N/mm <sup>2</sup> ]	- granica razvlačenja
$R_k$	[N/mm <sup>2</sup> ]	- konačno naprezanje
$R_m$	[N/mm <sup>2</sup> ]	- vlačna čvrstoća
$R_{p0,2}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	- konvencionalna granica tečenja
$\Delta L$	[mm]	- produljenje
$\Delta L_u$	[mm]	- produljenje nakon kidanja
$\varepsilon$	[mm/mm]	- deformacija, istezanje (relativno roduljenje)
$\sigma$	[N/mm <sup>2</sup> ]	- naprezanje
$F$	[N]	- sila
$S_0$	[mm <sup>2</sup> ]	- površina poprečnog presjeka
$\varepsilon_{Atr}$	[mm/mm]	- trajna plastična deformacija
$\varepsilon_u$	[mm/mm]	- vrijednost istezanja nakon kidanja
$A$	[%]	- istezljivost, postotna deformacija nakon kidanja
<b>B</b>	[-]	- matrica ovisnosti deformacije u element o pomacima u čvorovima, matrica prelogoritamskih energetskih članova
<b>D<sub>k</sub></b>	[-]	- kinematički diferencijalni operator
<b>N</b>	[-]	- matrica funkcija oblika
$V$	[mm <sup>3</sup> ]	- volumen
<b>D</b>	[-]	- matrica elastičnosti
$\nu$	[-]	- Poissonov faktor
$u, v, w$	[mm]	- komponente pomaka u Kartezijevom koordinatnom sustavu
$u_i, v_i, w_i$	[mm]	- komponente pomaka $i$ -tog čvora konačnog elementa
<b>u</b>	[mm]	- vektor pomaka
<b>v</b>	[-]	- vektor stupnjeva slobode konačnog elementa
$x, y, z$	[mm]	- Kartezijeve koordinate
$x_i, y_i, z_i$	[mm]	- Kartezijeve koordinate $i$ -tog čvora konačnog elementa
<b>a</b>	[-]	- matrica koeficijenata u interpolacijskim polinomima
<b>S</b>	[-]	- matrica raspodjele naprezanja u konačnom elementu

*Izjavljujem pod punom materijalnom i moralnom odgovornošću da sam diplomski rad izradio samostalno koristeći se stečenim znanjem, navedenom literaturom i opremom Laboratorija za eksperimentalnu mehaniku Fakulteta strojarstva i brodogradnje Zagreb.*

*Ovom prilikom bih se zahvalio voditeljima rada prof.dr.sc. Janošu Kodvanju te dr.sc. Anti Bakiću za pruženu pomoć, uloženi trud te iskazano povjerenje tokom izrade diplomskog rada. Također bih se zahvalio asistentima Martinu Surjaku, mag.ing.mech., te Zvonimiru Tomičeviću, mag.ing.mech., na pomoći pri korištenju opreme Laboratorija za eksperimentalnu mehaniku, te laborantu Gordanu Plačku za pomoć pri izradi potrebnih dijelova konstrukcije.*

*Posebno bih se zahvalio svojoj obitelji te djevojci na pruženoj podršci tijekom studija.*

*Maroje Ćus*

---

Potpis

## 1. Uvod

Vanjska fiksacija je operacijsko liječenje prijeloma dugih kostiju primjenom vijaka ili žica u i kroz kost koji se učvršćuju za vanjsku konstrukciju. Aplikacija konstrukcijski jednostavnog vanjskog fiksatora koji ujedno osigurava dostatnu stabilnost koštanih ulomaka, omogućuje zbrinjavanje većeg broja pacijenata u kratkom vremenskom periodu.

U ovom radu prikazani su rezultati dobiveni ispitivanjem stabilnosti vanjskog fiksatora tvrtke *Orthofix*, eksperimentalno i računalnom simulacijom u programskom paketu *Abaqus*, te rezultati nove konstrukcije vanjskog fiksatora dobiveni računalnom simulacijom. Svrha istraživanja je da se provjeri da li nova konstrukcija koja je jednostavnija za korištenje, manjih gabaritnih dimenzija, zadovoljava minimalne kriterije krutosti koje zadovoljava postojeća konstrukcija vanjskog fiksatora tvrtke *Orthofix*. Ukoliko nova konstrukcija zadovoljava minimalni kriterij krutosti, kao i kriterije vezane uz brzu i jednostavnu montažu, konstrukcija će biti spremna za izradu prototipa.

Zahvaljujući pronalasku novih materijala s poboljšanim karakteristikama, manje specifične težine, veće čvrstoće, te novim tehnologijama izrade i obrade polusirovina, moguće je napraviti novu konstrukciju koja će biti jednostavnija za korištenje, uporabu, te montažu. Ta činjenica vrlo je važna s obzirom na to da se u ratnoj traumatologiji i svakodnevnoj mirnodopskoj kliničkoj praksi vrlo često javlja problem prijema većeg broja politraumatiziranih bolesnika u jedinici vremena koji se istovremeno ne mogu zbrinuti obzirom na limitirani broj operacijskih timova i dvorana, te je iz tog razloga značajan postotak odloženih operacija. Aplikacijom konstrukcijski jednostavnog vanjskog fiksatora postigla bi se stabilizacija i možebitno definitivno zbrinjavanje prijeloma u kratkom vremenskom periodu kod većeg broja pacijenata. Navedeni rezultati bi osigurali brži oporavak i kraću hospitalizaciju pacijenata, liječenje s manjim brojem komplikacija i pouzdanije cijeljenje fraktura.

U radu su provedena 3 osnovna ispitivanja. Vanjski fiksator *Orthofix* ispitan je eksperimentalno na statičkoj kidalici, najprije sa aksijalnim opterećenjima od 250 N, 500 N, 750 N i 1000 N, te na savijanje s opterećenjima od 50 N, 100 N, 150 N, 200 N i 250 N. Cijeli eksperiment snimljen je optičkim mjernim sustavom *Aramis* s kojime su kasnije dobiveni rezultati za pomake i deformacije. Isto tako provedena je i računalna simulacija vanjskog fiksatora *Orthofix* u programskom paketu *Abaqus* kako bi se rezultati mogli usporediti, te su ujedno provedene i simulacije s istim opterećenjima na modelu nove konstrukcije vanjskog fiksatora.

Dobiveni rezultati pokazuju kako nova konstrukcija u usporedbi s ispitanim fiksatorom nema zadovoljavajuću krutost, te su nužne konstrukcijske izmjene na nekim dijelovima kao što su vrat kugle zgloba te nosač vijaka. Te izmjene će kod većih opterećenja smanjiti pojavu lokalnih maksimalnih naprezanja koja su kod postojeće konstrukcijske izvedbe veća od dopuštenih, što će znatno smanjiti opasnost od loma i povećati krutost konstrukcije, a neće imati negativan utjecaj na funkcionalne zahtjeve brze i jednostavne montaže i osiguranja dostatne stabilnosti koštanih ulomaka.

## 1.1 Povijest vanjskog fiksatora

Ratovi u povijesti, posebno od Napoleonovih ratova, doprinijeli su stjecanju novih iskustava o ozljedama čovjeka. Larrey (1766.-1842.), Napoleonov vojni kirurg i prvi sanitetski general u francuskoj revoluciji, tvrdio je da rano žrtvovanje ozlijeđenog dijela tijela daje najbolje izgleda za preživljavanje, s postotkom ozdravljenja 75-80% [1]. Larrey osniva prve poljske bolnice i naglašava važnost primarne amputacije udova kod ratnih ozljeda. 1803.godine zajedno sa Guthrieom (1815.) dokazuje da primarna amputacija na bojišnici daje bolje rezultate nego sekundarna nakon nekoliko tjedana. Njemački kirurg Bilger odbacuje njihov radikalni stav, a amputaciju kao ireverzibilni zahvat predlaže iznimno. Kirurgija je značajno napredovala stečenim brojnim iskustvima na ratištima te ukupnim razvojem medicine, posebno nakon 1850. razvojem anestezije (dušični oksidul - Davy 1819., eter - Morton 1846.) , asepse (Bergmann 1877.) i antisepse (Lister 1867.), protuupalnih lijekova (penicilin - Fleming 1928., Domagk 1935.) i transfuzije krvi.

Tehniku primarne kirurške obrade rane, naročito kod prijeloma, usavršio je u španjolskom građanskom ratu Trueta, a zatim Judin i Petrov u Rusiji. Nakon radikalne obrade rane primijenio je zatvoreni gipsani zavoj. Time se postizalo tri cilja, imobilizaciju, zaštitu od naknadne infekcije i drenažu. Ova metoda je korištena i u II. svjetskom ratu [2].

Imobilizacija je još od prastarih vremena sastavni dio u liječenju ozljeda jer je mirovanje ozlijeđenog uda preduvjet koštanog srašćivanja. Kod Egipćana se još 1700. godine prije nove ere opisuje longeta od palminog drveta. Hipokrat je opisao liječenje koštanih prijeloma na način koji još i danas vrijedi: trakcija, manipulacija, udlage. Do 15. stoljeća za imobilizaciju se koriste razne vrste daščica i šina. Do bitke kod Crecia 1346. godine, kada je prvi put upotrijebljeno vatreno oružje, ratni prijelomi kostiju udova bili su u osnovi jednaki mirnodopskim prijelomima. U liječenju prijeloma koriste se samo konzervativne metode jer za kirurško liječenje nema uvjeta. Larrey je koristio šinu uz tvrdu povjesku od impregniranog bjelanca, a Seutin povjesku od škroba. Thomas je napravio udlagu koja se i danas koristi u transportnoj imobilizaciji. Iako se sadra u liječenju prijeloma upotrebljava već u 10. stoljeću kod Arabljana, tek od Mathijesena 1852. godine, upotrebljavaju se zavoji natopljeni gipsom kao sredstvo imobilizacije. Pirogov koristi sadreni zavoj za longete u ratnoj kirurgiji, a Olier zatvoreni gipsani zavoj za rane i prijelome od vatrenog oružja. To je bilo najbolje sredstvo vanjske imobilizacije za liječenje prijeloma kostiju ekstremiteta sve do II. svjetskog rata kada se počinje koristiti vanjski fiksator. Napretkom tehnologije i medicine nakon uvođenja asepse i antisepse te anestezije i transfuzije počinje operacijsko liječenje prijeloma kostiju. Böhler je 1929. godine zapisao da je osamdesetih godina 19.stoljeća u većine bolesnika otvoreni lom bio smrtna ozljeda. Tscherne [3] je opisao četiri ere liječenja otvorenih lomova: era spašavanja života, era spašavanja udova, era izbjegavanja infekcije davanjem antibiotika od sredine 1960. godine, i era spašavanja funkcije. Tijekom II. svjetskog rata sve su zaraćene vojske uvele pravilo da se otvoreni koštani lom primarno stabilizira. U kasnijim ratovima kirurško znanje i mogućnosti stalno su se poboljšavali

uvođenjem antibiotika, novih kirurških materijala, vanjskih fiksatora, unapređenja operacijske tehnike i drugo.

Vanjski fiksator je prvi, pretpostavlja se, izumio Hipokrat (460.-377.p.n.e.), ali je izum kroz vrijeme pao u zaborav [3]. Malgaine je prvi, 1853. godine, pokušao vanjsku fiksaciju prelomljenog ivera aparatom nalik na kliješta. Parkhill, 1897. godine, u SAD-u razvija aparat za repoziciju i imobilizaciju prijeloma dugih kostiju nazvan „koštana spona“. Prvi pravi aparat za vanjsku fiksaciju s narezanim vijcima primijenili su Lambote 1912. i Humphry 1917. godine. Crile 1919. uvodi vanjski fiksator za prijelome femura kod ratnih ozljeda. Braća Judet 1932. izrađuju fiksator poboljšanih mehaničkih sposobnosti. Hoffmann od 1938.-1954. prikazuje u stručnim radovima metode vanjske fiksacije koje su prihvaćene u više ustanova. Hoffmannov fiksator se jedini uz fiksator američke vojske od Stader-a i Haynes-a koristio u II. svjetskom ratu. Charnley je 1953. godine popularizirao kompresijski fiksator. Vidal je 1970. modificirao originalni Hoffmanov fiksator [5]. Ilizarov 1976., Wagner 1977., De Bastiani 1979., te Mathys-Rohr usavršavaju vanjski fiksator, posebno veličinu i oblik okvira, sa većim i jačim vijcima, te korištenjem boljih materijala. Vanjska se fiksacija masovno primjenjuje najprije u Vijetnamskom ratu, a potom i u Izraelsko-Arapskom, Afganistanskom i drugim ratovima.

Prije tridesetak godina počela je izrada vanjskih fiksatora i u Hrvatskoj. Prof.dr.sc. Nanković, prof.dr.sc. Hančević i prof.dr.sc. Koržinek sa suradnicima konstruirali su različite tipove vanjskih fiksatora koji su proizvedeni u tvrtci „Instrumentaria“ iz Zagreba [1].

## 1.2 Vanjski fiksator

Osnove liječenja svakog prijeloma [6] su u repoziciji fragmenata, imobilizaciji kroz dovoljno dugo razdoblje, te ranoj funkcionalnoj rehabilitaciji. Pod osnove liječenja prijeloma podrazumijeva se repozicija, fiksacija fragmenata te rana funkcionalna mobilizacija. Repozicija može biti indirektna (preko mekih tkiva) i direktna manipulacijom koštanih fragmenata manualno ili instrumentalno. Da bi prijelom srastao fragmenti trebaju mirovati dovoljno dugo vremena da preraste nova kost i međusobno se učvrste. Konzervativno se to postiže sadrenom longetom i gipsom, a ponekad trakcijom (ekstenzijom). Operativna fiksacija može biti vanjska i unutrašnja. Postoje dva osnovna načela osteosinteze: interfragmentarna kompresija, navođenje i njihova kombinacija. Interfragmentarna kompresija može biti statička i dinamička. Sredstva statičke kompresije su pritezni vijak, prenapregnuta pločica, te vanjski fiksator ako je s njim postignuta kompresija. Dinamička kompresija koristi sile koje se javljaju na mjestu prijeloma pri normalnoj upotrebi ekstremiteta. Navođenje većinom ne dovodi do apsolutne stabilnosti ulomaka, te rezultira sekundarno cijeljenje. Razlikuje se unutrašnje navođenje medularnim čavlom, kutnom pločom 130° i kod nekih dječjih prijeloma Kirschnerovim žicama. Vanjsko navođenje postiže se primjenom vanjskih fiksatora. Kombinacija interfragmentarne kompresije i navođenja je u primjeni priteznih vijaka i neutralizacijske ploče, a u blizini zglobova potpornih ploča. U liječenju prijeloma dugih kostiju najčešće se koriste intramedularni čavao, ploča i vanjski fiksator. Svako od ovih sredstava fiksacije ima svoje prednosti i nedostatke u odnosu na tri osnovna problema cijeljenja kosti: infekti, instabilitet i cirkulacija kosti.

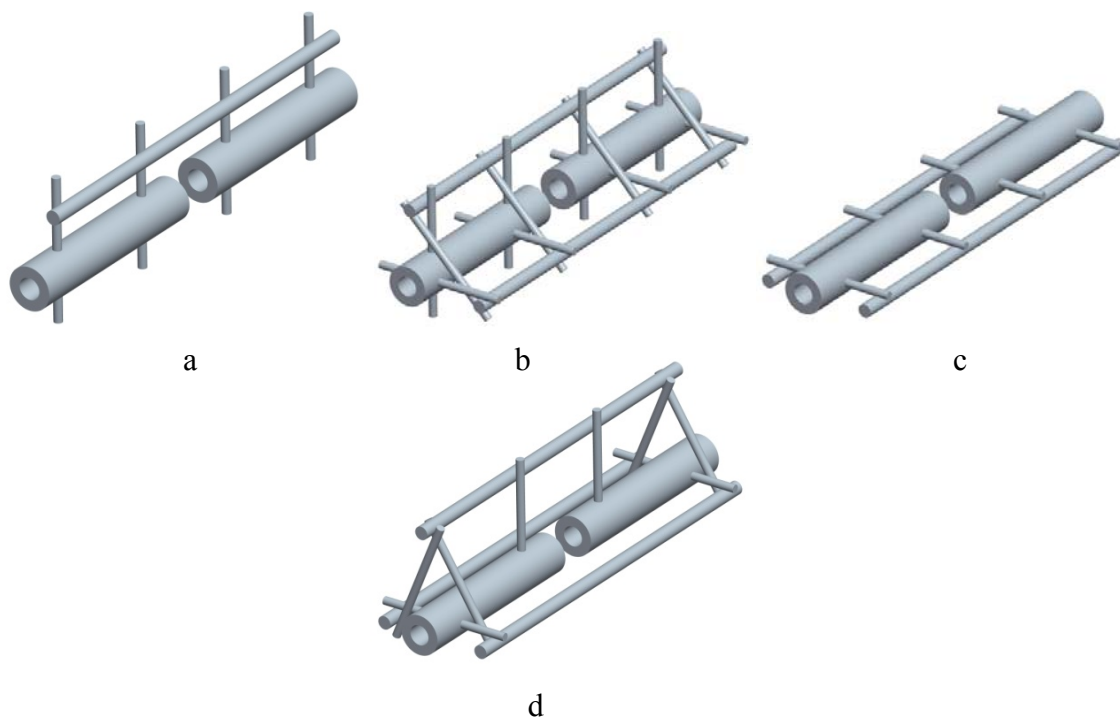
Vanjski fiksator je ekonomski prihvatljiv, više puta upotrebljiv, omogućava sekundarne korekcije i idealan je za otvorene prijelome dugih kostiju tipa II i III po Gustilu i Andersonu. Funkcionalna terapija je otežana kod primjene vanjskog fiksatora, a i brojne su komplikacije vezane za njegovu primjenu. On često nije definitivno rješenje nego zahtjeva sekundarnu osteosintezu (konverziju) čavlom ili pločom. To kod primjene ploče znači ponovni pristup mjestu prijeloma, ponovno ugrožavanje cirkulacije i aplikaciju spongioze. Kod primjene konverzije čavlom ovi su nedostaci manje izraženi i on je prihvatljiviji u analiziranim publikacijama od ploče.

Vanjski fiksator osim uklanjanja boli i sprečavanja komplikacija poput infekcije te ozljeda mekih česti, krvnih žila i živaca, imobilizacijom postiže koštano cijeljenje prijeloma, a pritom se ne gubi funkcija ozlijeđenog ekstremiteta. Vanjskim fiksatorom se štite okolna meka tkiva i omogućava daljnje kirurške zahvate na njima. Njime su se znatno smanjile indikacije za amputaciju udova. Vanjskim fiksatorom možemo ne samo očuvati nego i vratiti oštećenu funkciju ozlijeđenog ekstremiteta ranim razgibavanjem zglobova okrajine i boljom njegom bolesnika. Imobilizacija koja ne dozvoljava funkcionalno osposobljavanje vodi lokalnoj osteoporozi i atrofiji mišića koje mogu zaostati doživotno. Njegovo postavljanje je jednostavno i brzo s minimalnom operacijskom traumom ako je liječnik uvježban.

Indikacije za primjenu vanjskog fiksatora su svi teški, otvoreni, nestabilni, mnogoiverni prijelomi dijafiza, metafiza kao i zglobovi prijelomi dugih kostiju te prijelomi koji su komplicirani ozljedama krvnih žila i živaca. Uz bolje znanje tehnike i indikacije za aplikaciju sve su bolji rezultati liječenja. Kontraindikacije za liječenje ovom metodom ne postoje osim općih kirurških kontraindikacija. Prednosti vanjske fiksacije su:

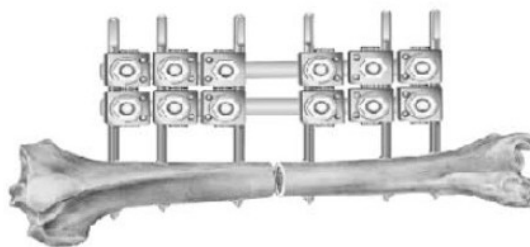
- 1) stabilizira prijelom rigidnom fiksacijom kosti kod teških otvorenih prijeloma kod kojih gips ili trakcija ne dozvoljavaju adekvatan pristup na ozljede mekih česti a osteosinteza može devitalizirati i kontaminirati ranu s rizikom infekcije i gubitkom uda,
- 2) postiže se dužina i osočina pomoću kompresije, neutralizacije ili distrakcije ulomaka prijeloma,
- 3) dozvoljava direktnu kontrolu stanja rane te neurovaskularni status rada,
- 4) omogućava zahvate na mekim tkivima (previjanje, naknadni debridman, ispiranje, sekundarni šav, kožni presadak) ili kostima (stimulacija osteogeneze: dekontakcija, spongioplastika) te bolju njegu bolesnika,
- 5) dozvoljava ranu fizikalnu terapiju neposrednim razgibavanjem susjednih zglobova čime sprečava fibrozu kapsule, ukočenost zglobova, atrofiju mišića i osteoporozu,
- 6) dozvoljava ranu mobilizaciju bolesnika.

Vanjska fiksacija predstavlja metodu stabilizacije prijeloma kostiju ostvarenu postavljanjem vijaka koji ulaze u ili kroz kost, te njihovo povezivanje na vanjski okvir. Dvije su osnovne vrste okvira, unilateralni i bilateralni, a mogu se postaviti u jednoj ili dvije ravnine. Aplikacija u jednoj ravnini je dovoljna za većinu ozljeda, a u dvije ravnine za neutralizaciju prijeloma koji su više pomaknuti i rotirani, slika 1.1 [6].



*Slika 1.1 Vrste okvira vanjskog fiksatora: a - Unilateralni okvir, jedna ravnina; b - Unilateralni okvir, dvije ravnine; c - Bilateralni okvir, jedna ravnina; d - Bilateralni okvir, dvije ravnine*

U svijetu se koristi više od 700 različitih tipova vanjskih fiksatora. Razlikuju se većinom u tehnologiji materijala i po obliku. Vanjski fiksator je u modernoj unilateralnoj verziji najpoštedniji operacijski postupak prema mekim tkivima, slika 1.2 i slika 1.3.



*Slika 1.2 Unilateralni fiksator u jednoj ravnini s dvostrukom šipkom [7]*



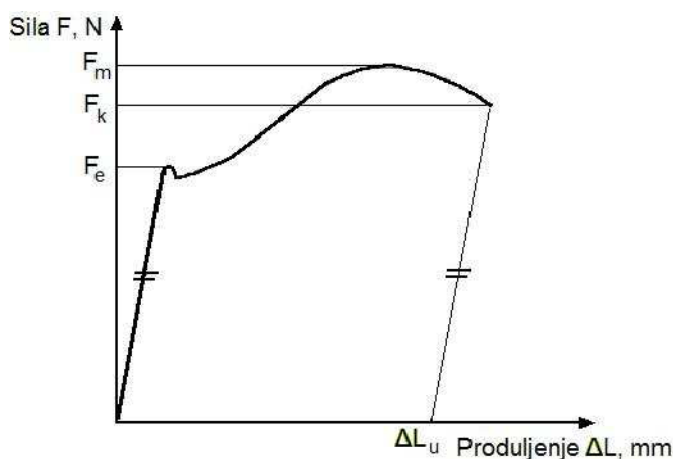
*Slika 1.3 Unilateralni fiksator u dvije ravnine (delta ili V-oblik okvira) [8]*

Postavljeni okvir mora biti optimalno prilagođen vitalnoj anatomiji uda, mora osigurati trajnu stabilnost ulomaka, te omogućiti lagan pristup ozljedi za debridement i druge sekundarne zahvate. Konstrukcija fiksatora treba udovoljiti mehaničkim zahtjevima bolesnika i ozljede uz prihvatljiv komfor bolesnika. Tehnički je jednostavan za primjenu, nalaze se podalje od loma te se može naknadno korigirati položaj ulomaka. Neki ga autori smatraju primarnim i definitivnim osteosintetskim sredstvom, do potpune konsolidacije kosti, a drugi ga koriste primarno do sanacije ozljede mekih tkiva a potom mijenjaju unutrašnjom osteosintezom.

Vanjski fiksator uz minimalnu osteosintezu je po mnogima dvojbena osteosinteza, jer se povećava rizik od uništavanja mekih tkiva te se povećava rizik infekcije. U cilju poboljšanja neposrednog kontakta između ulomaka u zoni prijeloma neki autori koriste jedan do dva pritezna vijka, Kirschnerovu žicu ili rjeđe serklažnu žicu. Radi se kod prijeloma sa većim ulomcima uz širok periostalni ili muskularni pripoj, u zoni dobro prokrvljene kosti, sa solidnim pokrovom kože i mekih tkiva te kod intra i periartikularnih prijeloma.

### 1.3 Statički vlačni pokus

Statički vlačni pokus služi za određivanje mehaničkih svojstava kao što su modul elastičnosti  $E$ , vlačna čvrstoća  $R_m$ , konvencionalna granica tečenja  $R_{p0.2}$ , produljenje  $\varepsilon$  materijala pri statičkom opterećenju. Budući da u svakom tijelu opterećenje izaziva deformaciju, tako će se i pri statičkom vlačnom pokusu predmet ispitivanja produljivati. Stoga se pri statičkom vlačnom ispitivanju pored vrijednosti sile prati i produljenje epruvete. Na zaslonu se za vrijeme statičkog vlačnog pokusa crta dijagram sila-produljenje,  $F-\Delta L$ , koji se naziva i dijagramom kidanja. Produljenje  $\Delta L$ , u mm, predstavlja povećanje razmaka  $L_0$  [mm] koji je naznačen na epruveti prije ispitivanja ili postavljen u programu samog uređaja prije ispitivanja, a predstavlja početnu mjernu duljinu. Na slici 1.4 prikazan je dijagram kidanja  $F-\Delta L$  za neki konstrukcijski čelik.



Slika 1.4 Dijagram kidanja  $F-\Delta L$



U prvom dijelu dijagrama  $F-\Delta L$  linearna je ovisnost sile i produljenja, što znači da istim prirastima sile odgovaraju i jednaka produljenja. U području elastičnih deformacija, za naprezanja niža od vrijednosti  $R_e$ , slika 1.5, vrijedi Hookeov zakon:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (1.1)$$

gdje je  $E$ , modul elastičnosti, elastična konstanta materijala čija veličina ovisi o čvrstoći veze između atoma u kristalnoj rešetci ili amorfnoj strukturi, a  $\varepsilon$ , istežanje ili relativno produljenje.

Linearno područje dijagrama naprezanje-istežanje (tzv. elastično područje) naziva se Hookeovim pravcem. Što je modul elastičnosti veći, veći je i koeficijent smjera Hookeova pravca, tj. kut između Hookeova pravca i osi apscisa.

Takva zakonitost vrijedi sve do vrijednosti sile  $F_e$  koja se naziva silom tečenja (razvlačenja). Nakon dostizanja te sile ispitni uzorak se nastavlja produljivati uz čak i mali pad opterećenja. Za daljnji porast produljenja opet je potreban porast sile. Međutim u tom dijelu statičkog vlačnog ispitivanja više ne postoji linearna ovisnost između sile i produljenja. Opterećenje se povećava sve do dostizanja maksimalne sile  $F_m$ , nakon koje se epruveta nastavlja produljivati uz sve manju i manju silu. Konačno, pri vrijednosti sile  $F_k$  dolazi do loma (pucanja) ispitnog uzorka.

Sastavi li se puknuti ispitni uzorak, te izmjeri razmak točaka koji je prije ispitivanja iznosio  $L_0$  dobiti će se konačna mjerna duljina  $L_u$ .

Produljenje nakon kidanja  $\Delta L_u$ , tada iznosi

$$\Delta L_u = L_u - L_0. \quad (1.2)$$

Ta vrijednost naznačena je također na apscisi, a dobiva se ako se iz konačne točke dijagrama povuče paralela s linearnim dijelom dijagrama (Hookeovim pravcem) i nađe presjecište tog pravca i osi apscisa, slika 1.4. Iznosi sile pri statičkom vlačnom ispitivanju ne daju uvid u ponašanje materijala ukoliko se u obzir ne uzme površina poprečnog presjeka ispitnog uzorka [9]. Stoga se uvodi pojam naprezanja, tj. sile po jedinici površine prema izrazu

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad (1.3)$$

gdje je  $F$  sila, a  $S_0$  površina početnog presjeka.

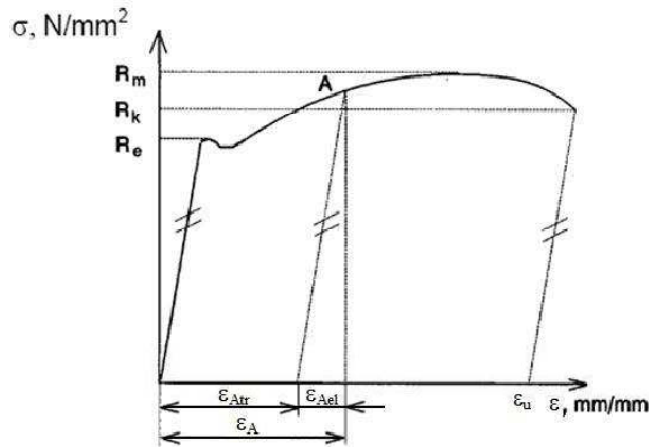
Istežanje ili relativno produljenje (produljenje po početnom razmaku) dano je izrazom

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (1.4)$$

a može biti izraženo i u postocima

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100. \quad (1.5)$$

Na taj se način iz dijagrama sila – produljenje  $F-\Delta L$  dobiva dijagram naprezanje – istezanje  $\sigma-\varepsilon$ , slika 1.5.



Slika 1.5 Dijagram naprezanje – istezanje  $\sigma-\varepsilon$

Materijal nakon prijedene granice razvlačenja ulazi u područje plastičnih ili trajnih deformacija. Ako se u točki A, slika 1.5, ispitni uzorak rastereti ( $\sigma = 0$ ) u njoj će ostati prisutna plastična ili trajna deformacija  $\varepsilon_{Atr}$ . To znači da će razmak mjernih točaka koji je prije označen sa  $L_0$  biti uvećan za iznos  $\Delta L_A$ .

$$\varepsilon_{Atr} = \frac{\Delta L_A}{L_0} \quad (1.6)$$

Naprezanje kod maksimalne sile naziva se vlačnom ili rasteznom čvrstoćom i jednako je

$$R_m = \frac{F_m}{S_0}, \quad (1.7)$$

naprezanje kod kojeg ispitni uzorak puca naziva se konačnim naprezanjem i definirano je izrazom

$$R_k = \frac{F_k}{S_0}, \quad (1.8)$$

Vrijednost istezanja nakon kidanja određuje se prema izrazu

$$\varepsilon_u = \frac{L_u - L_0}{L_0}, \quad (1.9)$$

a dobiva se u dijagramu  $\sigma-\varepsilon$  na isti način kao i vrijednost  $\Delta L_u$  u dijagramu  $F-\Delta L$  povlačenjem paralele iz konačne točke dijagrama s Hooke-ovim pravcem i nalaženjem presjecišta tog pravca s osi apscisa, slika 1.5. Ukoliko se vrijednost  $\varepsilon_u$  izrazi u postocima označava se slovom A i naziva istezljivost

$$A = \varepsilon_u \cdot 100. \quad (1.10)$$

## 1.4 Metoda konačnih elemenata

Metoda konačnih elemenata numerička je metoda koja je nezaobilazna u inženjerskim proračunima. Danas postoji velik broj računalnih programa temeljenih na ovoj metodi, koji omogućuju analizu konstrukcija bez razmatranja složene teorije koja opisuje fizikalno ponašanje konstrukcije. Budući da je metoda konačnih elemenata numerička metoda sva dobivena rješenja su približna, odnosno realnim vrijednostima može se samo približiti uz pravilan odabir proračunskog modela i uz pravilno odabrane tipove konačnih elemenata. Zbog toga je naročito važno poznavati fizikalno ponašanje konstrukcije koja se analizira te poznavati teorijske osnove konačnih elemenata [10].

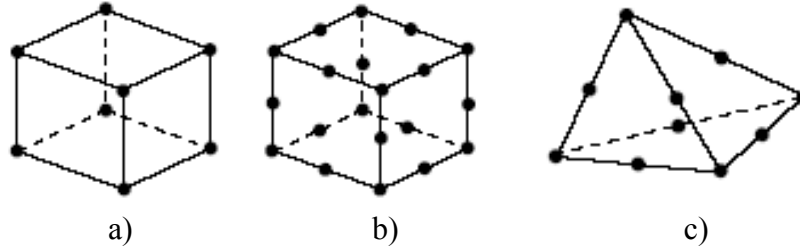
Ova metoda temelji se na diskretizaciji kontinuuma, odnosno područje kontinuuma se dijeli na konačan broj potpodručja koja se nazivaju konačni elementi. Dakle, promatrani kontinuum postaje mreža konačnih elemenata. Elementi su međusobno povezani točkama koje nazivamo čvorovima, a stanje u svakom elementu (pomaci, deformacije, naprezanja, temperatura ..itd.) opisano je interpolacijskim funkcijama koje moraju zadovoljavati određene uvjete. Najprije se izračunavaju karakteristične veličine u svakom konačnom elementu posebno (lokalno), a zatim se određenim transformacijama mogu izračunati za cijelu konstrukciju (globalno). U pravilu, sa povećanjem broja konačnih elemenata (progušćivanjem mreže konačnih elemenata) dobiveno rješenje je točnije, naravno uz pravilnu formulaciju konačnih elemenata. U analizi ovog zadatka korišteni su elementi za analizu čvrstih tijela.

Često se konačni elementi za analizu čvrstih tijela dijele na :

- 1) Gredne elemente (*Beam*),
- 2) Ljuskaste elemente (*Shell*),
- 3) 3D konačne elemente (*Continuum, Solid*).

### 1.4.1 3D konačni elementi

Ovi se elementi koriste kada je geometrija ili opterećenje prekompleksno da bi se problem rješavao nekim drugim tipom elemenata s manje prostornih dimenzija, jer je za postizanje iste točnosti kao za jednodimenzijske i dvodimenzijske probleme potreban mnogo veći broj stupnjeva slobode. Odnosno, pri 3D analizi valja računati sa znatno većim brojem nepoznanica (računalno zahtjevnije). Stupnjevi slobode kod 3D elemenata su 3 translacije u svakom čvoru (1, 2 i 3), dok su kod 2D elemenata aktivni samo stupnjevi slobode 1 i 2. Kod ovih elemenata su izlazne varijable (npr. naprezanje i deformacije) vezane uz globalni Kartezijev koordinatni sustav (*default*), ali je izlazne varijable moguće vezati uz definirani, lokalni koordinatni sustav.



Slika 1.6 Često korišteni 3D elementi: a) heksaedarski element prvog reda, b) heksaedarski element drugog reda, c) tetraedarski element drugog reda [11]

Osim problema porasta broja stupnjeva slobode, kada se bira 3D element čime simulaciju postaje računalno skupljom, treba još upozoriti na sljedeće. Kad je god moguće bolje je koristiti elemente u obliku paralepipeda ili tetraedarske elemente drugog reda, slika 1.6. Razlog ovome je što je raspodjela pomaka osnovnog tetraedarskog elementa (prvog reda sa 4 čvora) opisana s potpunim polinomima prvog stupnja. To znači da je raspodjela pomaka po plohi tetraedra linearna, a raspodjela deformacije koja je određena matricom **B** konstantna.

$$\mathbf{B} = \mathbf{D}_k \mathbf{N} = \frac{1}{6V} \begin{bmatrix} \beta_1 & 0 & 0 & \beta_2 & 0 & 0 & \beta_3 & 0 & 0 & \beta_4 & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_1 & 0 & 0 & \gamma_2 & 0 & 0 & \gamma_3 & 0 & 0 & \gamma_4 & 0 \\ 0 & 0 & \delta_1 & 0 & 0 & \delta_2 & 0 & 0 & \delta_3 & 0 & 0 & \delta_4 \\ \gamma_1 & \beta_1 & 0 & \gamma_2 & \beta_2 & 0 & \gamma_3 & \beta_3 & 0 & \gamma_4 & \beta_4 & 0 \\ 0 & \delta_1 & \gamma_1 & 0 & \delta_2 & \gamma_2 & 0 & \delta_3 & \gamma_3 & 0 & \delta_4 & \gamma_4 \\ \delta_1 & 0 & \beta_1 & \delta_2 & 0 & \beta_2 & \delta_3 & 0 & \beta_3 & \delta_4 & 0 & \beta_4 \end{bmatrix} \quad (1.11)$$

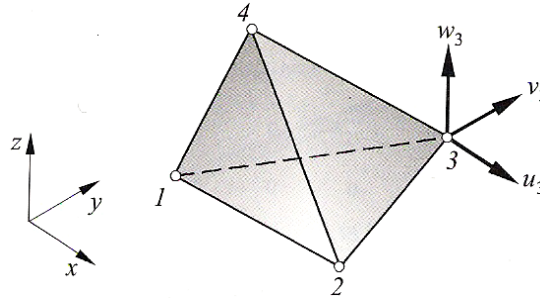
Isto tako je i raspodjela naprezanja kod tog elementa konstanta jer je matrica naprezanja jednaka umnošku matrice elastičnosti **D** koja je konstantna i matrice **B** (**S** = **DB**). S obzirom da je raspodjela deformacije i naprezanja konstantna potrebno je imati vrlo gustu mrežu da bi se realnu raspodjelu naprezanja moglo dobro aproksimirati, pogotovo ako je problem takav da se pojavljuje veliki gradijent naprezanja 0.

$$\mathbf{D} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (1.12)$$

### 1.4.2 Osnovni tetraedarski element

Najjednostavniji konačni element [10] za trodimenzijsku analizu kontinuuma je osnovni tetraedarski element, slika 1.7, s 12 stupnjeva slobode. Element se sastoji od 4 čvora u vrhovima tetraedra s po tri komponente pomaka  $u$ ,  $v$  i  $w$  u pravcu Kartezijevih koordinatnih osi. Stupnjevi slobode su komponente pomaka u čvorovima

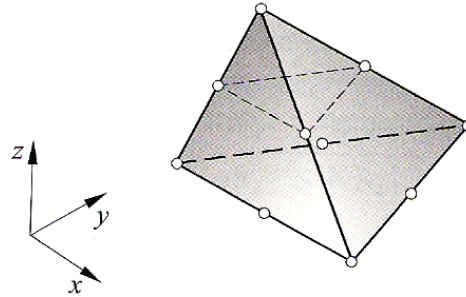
$$\mathbf{v}^T = [u_1 \quad v_1 \quad w_1 \quad u_2 \quad v_2 \quad w_2 \quad u_3 \quad v_3 \quad w_3 \quad u_4 \quad v_4 \quad w_4]. \quad (1.13)$$



Slika 1.7 Osnovni tetraedarski konačni element [10]

### 1.4.3 Tetraedarski elementi višeg reda

Dodavanjem čvorova osnovnom tetraedarskom elementu [10] izvodi se tetraedarski element višeg reda, slika 1.8. Pritom je poželjno da polinomi funkcija pomaka budu potpuni.



Slika 1.8 Tetraedarski element drugog reda [10]

Pomoću potpunog polinoma drugog stupnja opisano je polje pomaka tetraedarskog elementa drugog reda s 10 čvorova i 30 stupnjeva slobode. Komponente pomaka u Kartezijevom koordinatnom sustavu su

$$\begin{aligned} u &= a_1 + a_2x + a_3y + a_4z + a_5x^2 + a_6y^2 + a_7z^2 + a_8xy + a_9yz + a_{10}zx, \\ v &= a_{11} + a_{12}x + a_{13}y + a_{14}z + a_{15}x^2 + a_{16}y^2 + a_{17}z^2 + a_{18}xy + a_{19}yz + a_{20}zx, \\ w &= a_{21} + a_{22}x + a_{23}y + a_{24}z + a_{25}x^2 + a_{26}y^2 + a_{27}z^2 + a_{28}xy + a_{29}yz + a_{30}zx. \end{aligned} \quad (1.14)$$

## 1.5 Programski paket Abaqus

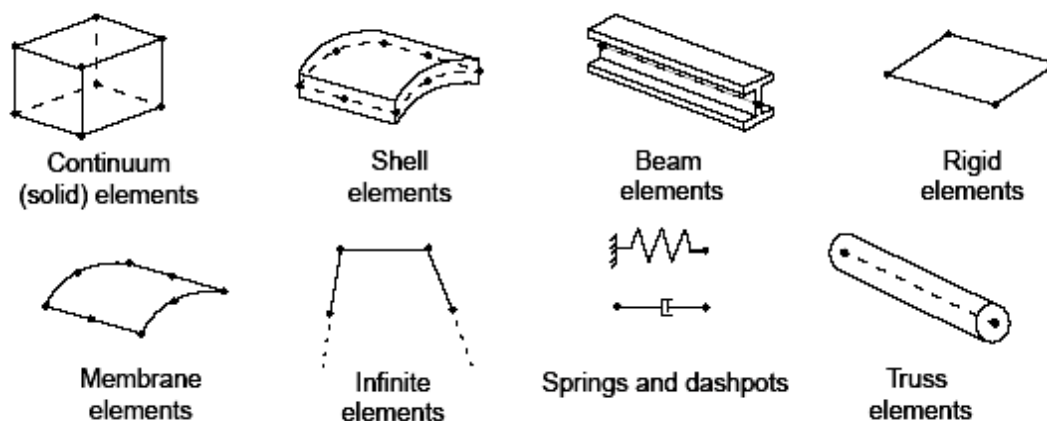
Abaqus [12] je programski paket temeljen na metodi konačnih elemenata, kojim se mogu rješavati različiti tipovi problema, od najjednostavnijih linearnih do složenih nelinearnih problema. Unutar samog programskog paketa pohranjena je velika baza elemenata s kojima se može modelirati bilo kakva geometrija. *Abaqus* se sastoji od dva osnovna proizvoda: *Abaqus/Standard* i *Abaqus/Explicit*.

*Abaqus/Standard* služi za analizu opće namjene linearnih i nelinearnih problema i biti će korišten tijekom izrade ovog rada. *Abaqus/Explicit* služi za analizu posebne namjene s nešto drugačijom formulacijom konačnih elemenata. Primjer upotrebe su kratke tranzijentne pojave. *Abaqus/CAE* je interaktivno grafičko sučelje za *Abaqus* koje služi za lako i brzo kreiranje modela.

Tijek modeliranja kreće od stvaranja ili importiranja geometrije samog tijela na kojem se želi izvršiti simulaciju. Geometriju tijela je moguće konstruirati (nacrtati) unutar samog *Abaqus*-a, putem njegovih jednostavnih alata za izradu geometrije, no najbolji način za stvaranje geometrije, pogotovo složenijeg tipa, je da se geometrija tijela modelira u nekom drugom programskom paketu koji ima složenije alate za izradu, te da se takva konstruirana i sklopljena geometrija prenese u *Abaqus* jednostavnim metodom pohranjivanja te geometrije u .step ili nekom sličnom formatu. Jednom dobivena ili iskonstruirana željena geometrija dalje zahtijeva zadavanje mehaničkih svojstva, od kojih su najvažnija materijal same geometrije za koji treba imati podatke o elastičnim i plastičnim svojstvima, te i drugi podaci koji su potrebni a koji, što je moguće bolje, opisuju realno stanje odabrane geometrije. Nakon što se geometriju tijela opiše mehaničkim svojstvima, potrebno je zadati ograničenja geometrije, rubne uvjete i uvjete opterećenja. Geometrijski rubni uvjeti najčešće podrazumijevaju ograničavanje stupnjeva slobode modela, odnosno zadavanje željenih translacijskih i rotacijskih pomaka (oslonci, uklještenja, rubni uvjeti simetrije itd.). Prirodni rubni uvjeti najčešće predstavljaju opterećenje modela tj. koncentrirane sile u čvorovima, ili raspodijeljeno volumensko, površinsko ili linijsko opterećenje. Na kraju ove faze potrebno je još model opisati mrežom konačnih elemenata. Do sada navedeno vrši se u radnoj cjelini koja se naziva *Preprocessing*.

Općenito se rad programa za računalnu simulaciju metodom konačnih elemenata dijeli na tri radne cjeline (faze): *Preprocessing*, *Simulation* i *Postprocessing*. Iz prve faze, *Preprocessing*, dobije se .inp file u kojem je u programskom kodu zapisana cijela geometrija, te rubni uvjeti i uvjeti opterećenja. Nakon simulacije iz izlaznih podataka se u fazi *Postprocessing*-a mogu dobiti rezultati na temelju kojih se donosi odluka o valjanosti nekog konstrukcijskog rješenja, a isto tako mogu poslužiti za verifikaciju eksperimentalno dobivenih rezultata ili rezultata dobivenih nekim drugim metodama i postupcima.

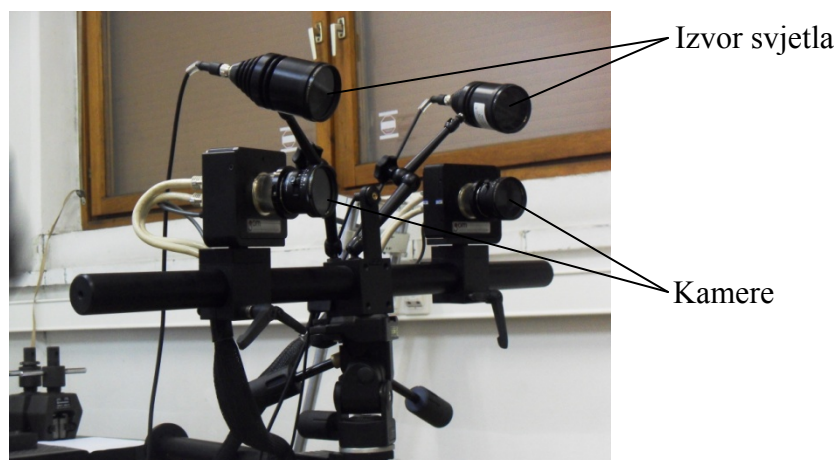
U *Abaqus*-u je dostupan veliki broj i široki spektar elemenata koji omogućuju rješavanje različitih problema, odnosno modeliranje različite geometrije. U ovom radu će biti korišteni elementi za analizu pomaka i naprezanja, međutim *Abaqus* ima biblioteku koja obuhvaća elemente za prijenos topline, difuziju mase, piezoelektričke, elemente za akustičku analizu i još mnoge druge tipove elemenata, slika 1.9.



Slika 1.9 Osnovni tipovi konačnih elemenata u programskom paketu Abaqus [11]

## 1.6 Optički mjerni sustav *Aramis*

*Aramis* [13] optički mjerni sustav, slika 1.10, temelji se na principu objektnog raster postupka. Služi za mjerenja trodimenzionalne promjene oblika i raspodjele deformacija s površine statički ili dinamički opterećenih ili deformiranih objekata. Primjenjuje se u analizi čvrstoće konstrukcija, određivanju svojstava materijala, verifikaciji i usavršavanju numeričkih proračuna, itd. Prikladan je za analizu objekata iz metalnih, kompozitnih, gumenih, drvenih i drugih materijala.



*Slika 1.10 Aramis optički mjerni sustav*

*Aramis* bezkontaktno i s visokom točnošću određuje:

- 1) Oblik snimanog objekta,
- 2) Polje trodimenzionalnih pomaka,
- 3) Polje tenzora deformacija i naprezanja,
- 4) Svojstva materijala.

Za razliku od tenzometara ili ekstenzometra koji daju samo pojedinačne mjerne vrijednosti, *Aramis* određuje raspodjelu deformacija po cijelom analiziranom području, što omogućuje bolje razumijevanje ponašanja materijala i konstrukcija.

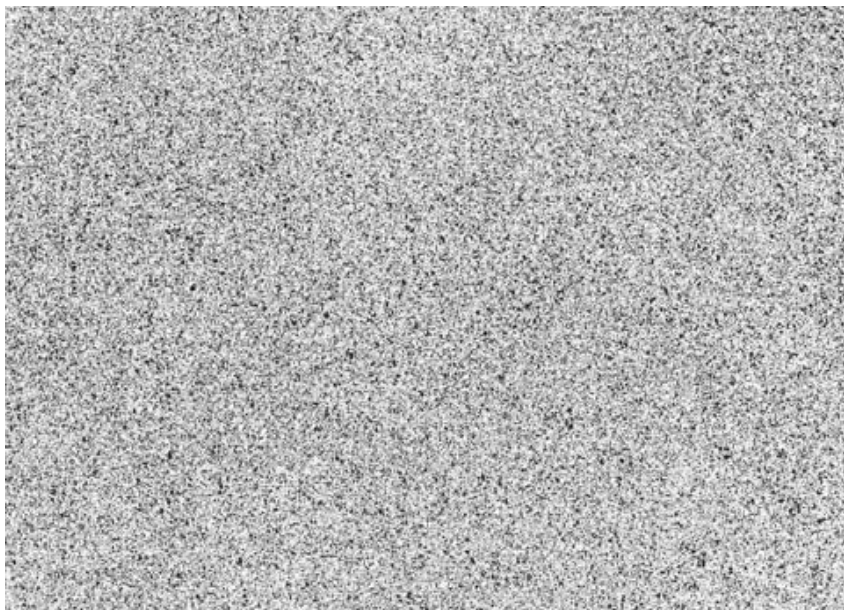
Tipične su analize:

- 1) Svojstva materijala na visokim ili niskim temperaturama,
- 2) Ponašanja spojeva i kontakata dvaju tijela,
- 3) Širenja pukotina,
- 4) Toplinskih deformacija,
- 5) Deformacija kod obrade ili zavarivanja materijala itd.



### 1.6.1 Mjerni postupak sa sustavom *Aramis*

**Priprema objekta** – na mjerni objekt nanosi se stohastični ili pravilni uzorak, slika 1.11, izrazitoga kontrasta, koji će prilikom promjene oblika objekta pratiti deformacije njegove površine. Uobičajen postupak je sprejanje bijelom i crnom bojom. Preporučuje se da uzorak bude što nepravilniji, kako bi se povećala vjerojatnost za pronalaženje istog polja u obje kamere.



*Slika 1.11 Stohastični uzorak na mjernom objektu – „raster“ [14]*

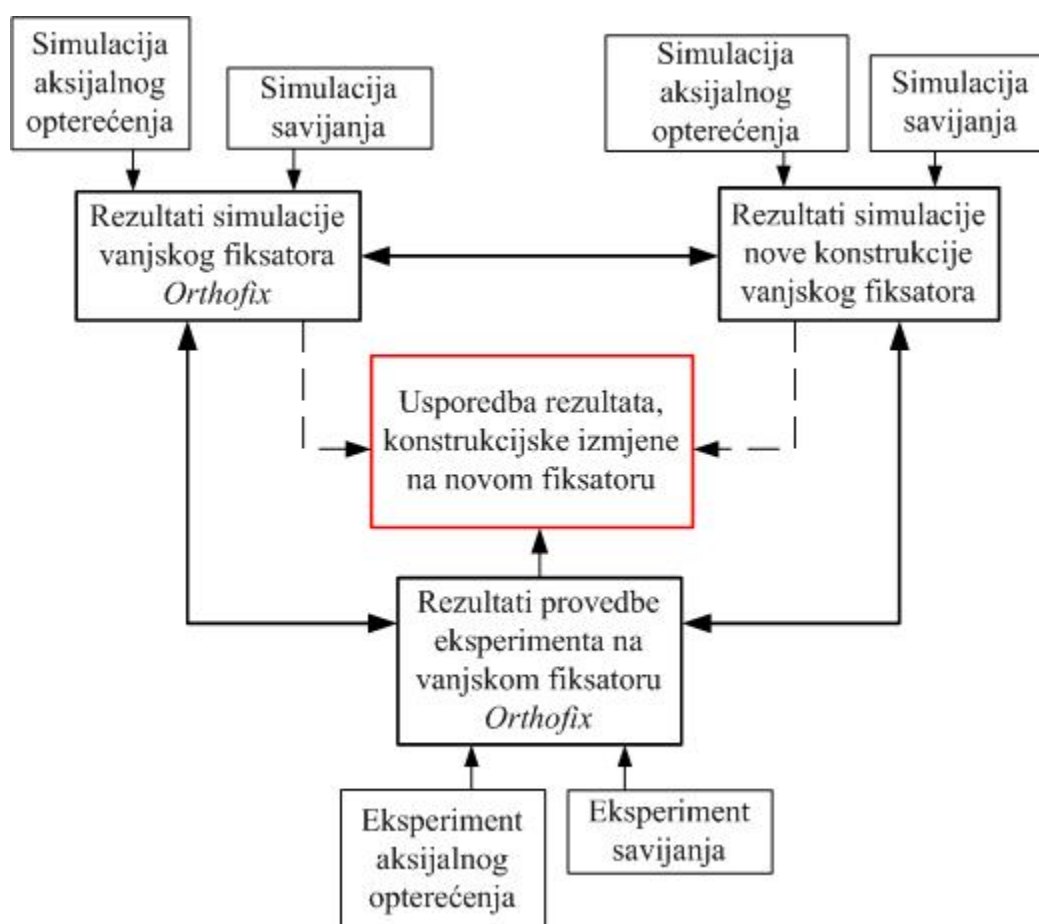
**Snimanje digitalnih fotografija** – kontrastni uzorak na površini objekta snima se tijekom ili nakon opterećenje pomoću jedne ili više kamera. Kamere mogu biti sinhronizirane s kidalicom ili uređajem za opterećivanje. Ovisno o vrsti kamera snima se i do 8000 fotografija u sekundi, što omogućuje preciznu analizu brzih dinamičkih procesa.

**Analiza fotografija** – za kompletno snimano područje određuju se trodimenzionalne koordinate točaka s površine objekta kao i polja pomaka i tenzora deformacija. Ako su poznata svojstva materijala, računa se i polje tenzora naprezanja. Analiza je potpuno automatizirana, tako da se i veliki broj stupnjeva opterećenja brzo i pouzdano obrađuje.

**Rezultati** – rezultati mjerenja prikazuju se u obliku 3D vizualizacija ili dijagrama u mjernim izvještajima ili se eksportiraju u standardiziranim formatima. Prikladni su za usporedbu s metodom konačnih elemenata i drugim numeričkim simulacijama.

## 2. Način predbe i svrha istraživanja

Istraživanje je provedeno kroz dvije glavne faze. U prvoj fazi provedena su mjerenja na postojećem vanjskom fiksatoru tvrtke *Orthofix*. Napravljena su dva eksperimenta, u jednom je eksperimentu vanjski fiksator opterećen aksijalno, dok je u drugom opterećen na savijanje u 4 točke. Druga faza istraživanja obuhvaća simulaciju u programskom paketu *Abaqus*, u kojem su također provedene simulacije aksijalnog opterećenja i savijanja. Konačni cilj istraživanja je nova konstrukcija vanjskog fiksatora iste ili veće krutosti od *Orthofix*-a. Krutost je neophodna za osiguranje dostatne stabilnosti koštanih ulomaka što je osnovni preduvjet brzog cijeljenja kosti bez dodatnih komplikacija. Ukoliko rezultati provedenih eksperimentalnih mjerenja i usporedba računalnih simulacija s istim opterećenjima pokažu da novi fiksator nema zadovoljavajuću krutost ili ima drugih nedostataka, prije izrade prototipa učinit će se neophodne konstrukcijske izmjene. Plan istraživanja prikazan je shemom na slici 2.1.



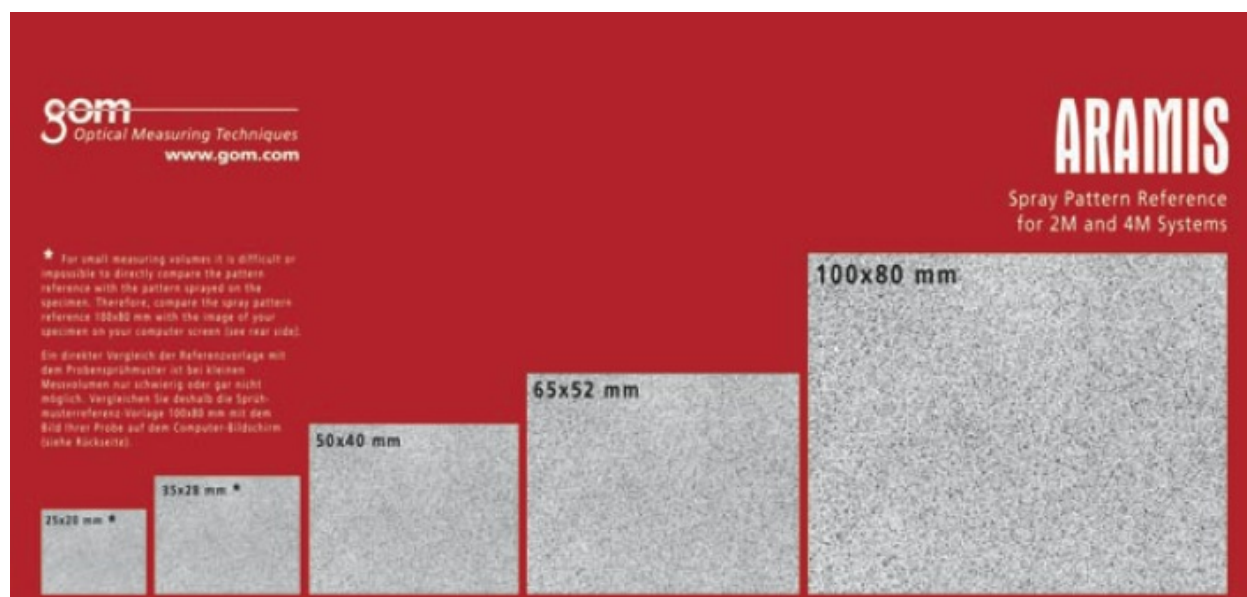
Slika 2.1 Shema plana istraživanja

### 3. Eksperimentalno ispitivanje stabilnosti vanjskog fiksatora

Prije početka svakog eksperimenta najvažnije ga je dobro isplanirati. Ta prva faza je i najbitnija, jer ako se na samom početku dobro pazilo na sve moguće nedostatke te se izabralo najbolje rješenje za dobivanje potrebnih podataka, tada će eksperiment ići brže, pa ako se i javi neki nepredvidljivi nedostatak, lakše će ga se ukloniti. Svako provođenje eksperimenta može se podijeliti u 4 faze:

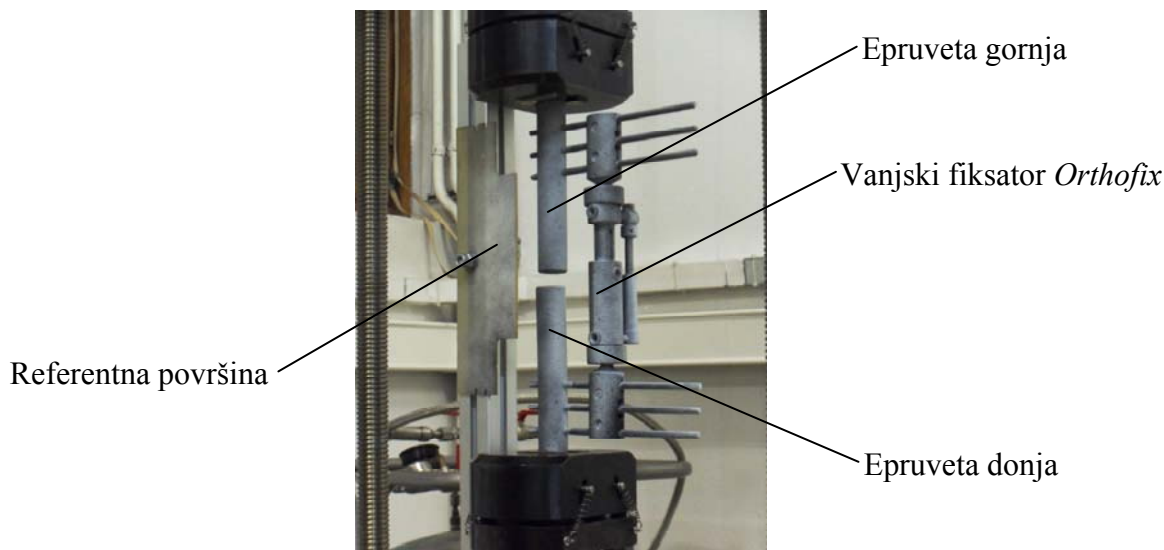
1. Priprema modela i sustava,
2. Kalibracija sustava,
3. Mjerenje, provedba eksperimenta,
4. Prikaz i obrada rezultata.

Mjerni objekt se najprije mora tretirati sa bojama u spreju kako bi se napravio potrebnii mjerni raster. Pošto je bolje da raster bude što nepravilniji boja se na površinu nanosi postupno, dozirajući je u par navrata najprije temeljnom pozadinskom bojom, ako je potrebno, te se nakon toga prešprica drugom bojom kako bi se dobio potreban efekt točkica po površini mjernog objekta. Površina je u ovom slučaju najprije premazana bijelom bojom zbog toga što je izrazito reflektirajuća, a to ne pogoduje mjernom sustavu jer se zrake svijetla tada raspršuju previše u prostor, te je nakon toga prešpricana crnom bojom sa kojom se dobilo efekt točkica. U drugim slučajevima kada bi površina bila tamna, ali nereflektirajuća, tada bi je bilo dovoljno prešpricati bijelom bojom čime bi se dobio efekt bijelih točkica te bi mjerenje bilo moguće ili obrnuto. Ta količina određena je prema uputama tvrtke koja je proizvela uređaj a uzorci se nalaze u uputama za primjenu, slika 3.1.



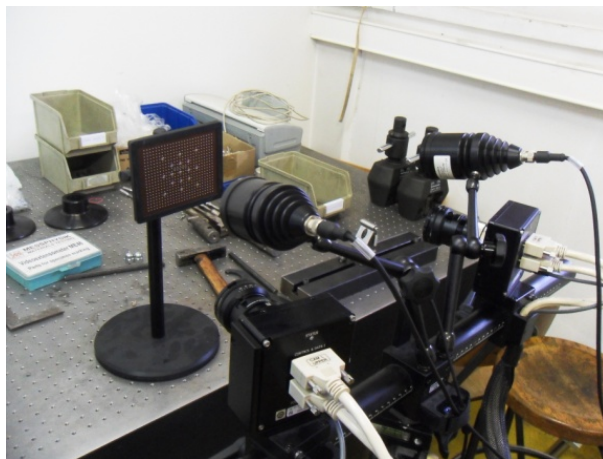
Slika 3.1 Uzorci rastera za određene mjerne površine [14]

Mjerni objekt se potom postavlja u vidno polje sustava, učvršćuje u čeljusti statičke kidalice. U kadar koji kamera snima tokom eksperimenta dobro je postaviti neki objekt koji se ne opterećuje tokom provođenja eksperimenta. Taj objekt se koristi kasnije kod proračunavanja dobivenih slika kao referentni objekt, pa se pomaci i deformacije mogu promatrati u odnosu na njega čime se oduzima mogućnost pogreške mjerenja u slučaju da se tokom snimanja pomaknuo sustav koji snima, slika 3.2.



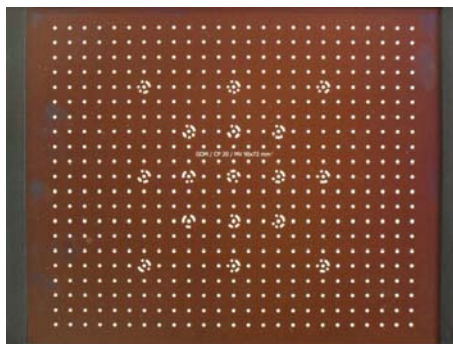
*Slika 3.2 Vanjski fiksator Orthofix u čeljustima statičke kidalice postavljen za eksperiment aksijalnog opterećenja*

Prije početka ispitivanja potrebna je kalibracija kamera, slika 3.3. Kalibracija služi kako bi se podesili unutarnji i vanjski parametri kamere, te kako bi se poništile sve nepravilnosti u kameri koje mogu biti uzrokovane okolinom u kojoj se provodi mjerenje (ako se između mjernog objekta i kamere nalazi staklo, ako je prostor zadimljen, prašnjav) ili samim kamerama (zaprljanost leća ili polarizacijskih stakala, ili različita oštećenja na lećama).



*Slika 3.3 Kalibriranje Aramis sustava*

Kalibracija se provodi postupkom koji je unaprijed određen u programu sustava, tako da se s unaprijed određenim parametrima postavke sustava, kao što su međusobne udaljenosti kamera, kuta kamere, udaljenosti sustava od mjernog objekta snima kalibracijski objekt (slika 3.4). Na taj način se jednom pikselu na slici koju kamera snima dodjeljuje stvarna mjerna jedinica milimetar.



Slika 3.4 Kalibracijski objekt

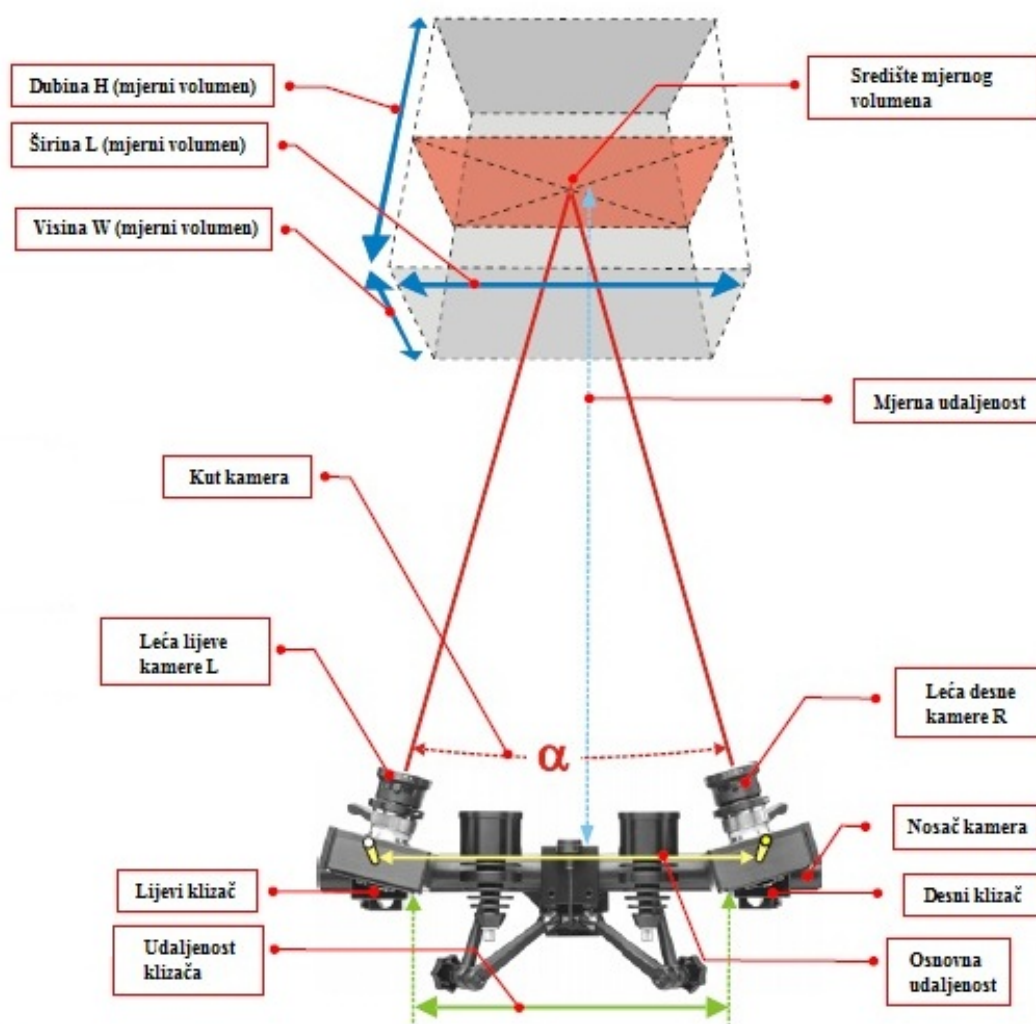
Parametri, koje je potrebno namjestiti prije svakog snimanja te ovise o snimanom mjernom volumenu, jesu otvor blende koji nam omogućava dovoljno svjetla na slici, fokus kamere koji nam omogućava oštrinu, te polarizacijska stakla koja se nalaze na svakoj kameri i na izvoru svjetla kako bi se dobilo svjetlo valne duljine u istoj ravnini. Te parametre podešavamo prema uputama proizvođača sustava, a ovise o snimanom mjernom volumenu, te potrebnoj dubini snimanja (slika 3.5).

Leće	Mjerni volumen [mm x mm]	Komentar	Min. udaljenost od mjernog objekta [mm]	Dist. prsten [mm]	Mjerna udaljenost [mm]	Udaljenost kamera [mm]	Kut kamere [°]	Kodirani kalibra- cijski objekti	Dubina mjernog volumena [mm]									
									1.4	2	2.8	4	5.6	8	11	16	22	32
50mm. familija leća Al (Titanar)	25 x 18	1)	500	25	205	66	26	CQ 23x18	---	---	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	---	---
	35 x 26	1)	500	12.5	225	70	25	CQ/CP20 30x24	---	---	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	1.8	---	---
	50 x 37	1)	500	12.5	260	88	25	CQ/CP20 55x44	---	---	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0.5	5.8	---	---
	65 x 48	---	500	---	305	108	25	CQ/CP20 55x44	---	---	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	4.6	13	---	---
	80 x 60	---	500	---	345	126	25	CQ/CP20 55x44	---	---	n.a.	n.a.	n.a.	2.1	9.6	22	---	---
	100 x 75	---	500	---	400	150	25	CP20 90x72	---	---	n.a.	n.a.	n.a.	7.6	19	38	---	---
	125 x 90	---	500	---	475	184	25	CP20 90x72	---	---	n.a.	n.a.	4.1	18	35	65	---	---
	150 x 110	---	500	---	550	216	25	CP20 175x140	---	---	n.a.	n.a.	12	32	57	99	---	---
	175 x 130	---	500	---	625	250	25	CP20 175x140	---	---	n.a.	4.6	22	49	82	140	---	---
	200 x 150	---	500	---	695	282	25	CP20 175x140	---	---	n.a.	11	34	68	110	190	---	---
	250 x 180	---	500	---	845	348	25	CP20 250x200	---	---	4.7	31	66	120	190	>250	---	---
	300 x 220	---	800	---	995	414	25	CP20 250x200	---	---	20	57	110	180	280	>300	---	---
	350 x 260	---	800	---	1140	480	25	CP20 350x280	---	---	38	88	160	260	>350	>350	---	---
	400 x 290	---	800	---	1290	546	25	CP20 350x280	---	---	62	130	220	350	>400	>400	---	---
	500 x 370	---	800	---	1590	678	25	CP20 350x280	---	---	120	230	370	>500	>500	>500	---	---
	750 x 550	2)	1200 fixed	---	2310	---	29	CC20 700x560	---	---	330	560	>750	>750	>750	>750	---	---
	1000 x 730	2)	1200 fixed	---	3070	---	22	CC20 1000x800	---	---	740	>1000	>1000	>1000	>1000	>1000	---	---
	1250 x 920	2)	1600 fixed	---	3800	---	24	CC20 1400x1120	---	---	1200	>1250	>1250	>1250	>1250	>1250	---	---
	1500 x 1100	2)	1600 fixed	---	4550	---	20	CC20 1400x1120	---	---	>1500	>1500	>1500	>1500	>1500	>1500	---	---
	1750 x 1300	2)	1600 fixed	---	5290	---	17	CC20 2000x1600	---	---	>1750	>1750	>1750	>1750	>1750	>1750	---	---
<b>Legenda:</b> 1) Bez laserske točkice 2) Za više informacija obratiti pažnju na upute za korištenje - "Hardware for ARAMIS"									--- Promjer leća nije moguće podešavati n.a. Nije moguće namjestiti fokus na cijeli mjerni volumen									

Slika 3.5 Parametri koji ovise o potrebnom mjernom volumenu [15]



Svi tablično prikazani parametri na slici 3.5 također su radi lakšeg razumijevanja prikazani slikom 3.6, čime se korisniku znatno olakšava korištenje sustava.

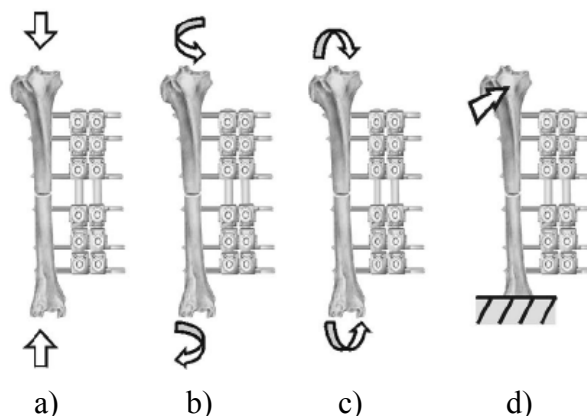


*Slika 3.6 Parametri sa kojima je potrebno namjestiti sustav u ovisnosti o potrebnom mjernom volumenu [15]*

Potrebno je naglasiti i to da kada se jednom sustav kalibrira za određeni mjerni volumen, nju je moguće pohraniti u memoriju sustava, i nije ju potrebno više ponavljati. Kada je sustav jednom izkalibriran, može ga se premještati na bilo koju lokaciju gdje se želi provesti mjerenje uz oprezno premještanje kamera, da se uslijed vibracija i udaraca nebi poremetila njegova kalibracijska postavka.

Postavljanjem mjernog objekta i kalibriranog mjernog sustava ispred njega može se započeti s provedbom eksperimenta. U ovom istraživanju provedena su 4 mjerenja pri aksijalnom opterećenju, te 5 mjerenja pri savojnom opterećenju vanjskog fiksatora.

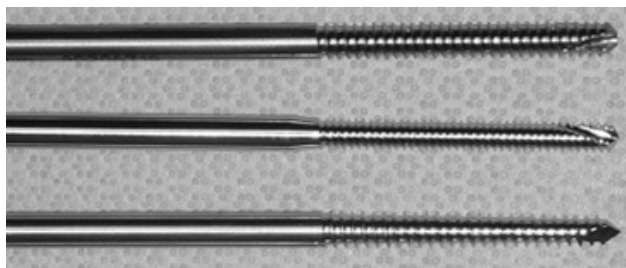
Uzmu li se u obzir sve mogućnosti opterećenja vanjskog fiksatora lako se može pokazati kako se sva opterećenja mogu svrstati u 4 osnovna koja su prikazana na slici 3.7. Ovo istraživanje obuhvaća ispitivanje pri aksijalnom opterećenju, koje simulira hodaње, te ispitivanje na savijanje koje se također često javlja pri normalnom korištenju vanjskog fiksatora.



*Slika 3.7 Shematska ilustracija 4 osnovna načina opterećenja sustava kost – fiksator: a) aksijalno, b) torzijsko, c) savojno, d) smično [7]*

Mjerenje pomaka pri aksijalnom opterećenju provedeno je za sile od 250, 500, 750 i 1000 N, dok su kod savijanja odabrane sile opterećenja od 50, 100, 150, 200 i 250 N. U oba slučaja eksperiment je proveden na način da je opterećenje narinuto jedno za drugim od najnižeg prema najvišem bez rasterećenja modela između dva koraka opterećivanja. Na taj način izbjegnuto je utjecaj eventualnih početnih pomaka (deformacija) zbog spore relaksacije modela nakon rasterećenja. Kako snimanje na svakom nivou opterećenja traje relativno kratko, za pretpostaviti je da puzanje materijala posebno pri maksimalnom opterećenju nije imalo znatnijeg utjecaja na rezultate za pomake.

Epruvete koje će simulirati kosti, izrađene su u obliku valjka, vanjskog promjera 26mm, ta vrijednost vanjskog promjera uzeta je kao srednja vrijednost različitih veličina tibije. Maksimalni [16] promjer vijka se u praksi uzima do trećine promjera kosti, no u teoriji je pokazano da ako je promjer vijka do 20% promjera kosti, torzijska krutost kosti se smanji za 34%. Kod promjera vijka do 50% promjera kosti, torzijska krutost kosti se smanji i do 62%. Najviše se koriste vijci promjera 5mm i 6mm zbog toga što se oba promjera mogu kombinirati za ugradnju i u tibiju i u bedrenu kost (femur). Za fiksiranje modela kosti u ovom radu su odabrani vijci promjera 6mm (slika 3.8).



*Slika 3.8 Vijci za kosti [16]*

Odabrani materijal epruvete modela kosti, slika 3.9, je polietilen, PE100, koji je po svojim mehaničkim svojstvima različit od kosti, niži modul elastičnosti, no pošto će se isti model koristiti i u simulaciji i u eksperimentu rezultati za pomake će biti međusobno usporedivi

Također je jedna od bitnijih svojstva polietilena, za razliku od nekog drugog materijala, ta što je materijal dovoljno tvrd te su elastična svojstva zanemariva pošto spada u grupu plastomera, što pogoduje provedbi eksperimenta u smislu potpunog prenošenja sile na vijke i vanjski fiksator. U odabranom materijalu, slika 3.9, postavljanje vijaka je jednostavnije nego u nekom materijalu poput čelika ili aluminija, u koje bi se vijci trebali lijepiti ili zavariti, ta isto tako omogućava obradu na tokarskom stroju do promjera 26mm te bušenje rupa za vijke.



*Slika 3.9 Epruvete za provedbu eksperimenta od polietilena, PE100*



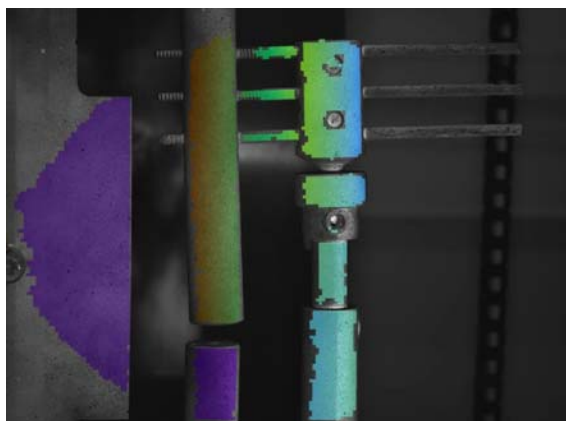
### 3.1 Mjerenje pomaka pri aksijalnom opterećenju vanjskog fiksatora *Orthofix*

Model kosti s montiranim vanjskom fiksatorom, postavlja se okomito u čeljusti statičke kidalice, te se na unaprijed određenu udaljenost postavlja sustav za mjerenje *Aramis*, slika 3.10. Prije početka eksperimenta, potrebno je okvirno izračunati vrijeme trajanja eksperimenta kako bi se u programu mjernog sustava moglo definirati ukupan broj slika i brzina otvaranja i zatvaranja blende, *Shutter time*, sa kojima će sustav provoditi eksperiment. Za brzinu opterećivanja je odabrano 5 N/s. Ova brzina je odabrana da se izbjegnu udarna opterećenja na mjerni objekt, te da se u slučaju pojavljivanja loma nekog dijela vanjskog fiksatora može na vrijeme zaustaviti cijeli eksperiment. Pošto je zadana brzina mala, u mjernom sustavu je tada postavljen spori način snimanja, tj. 1 slika po sekundi, čime je omogućeno povećavanje vremena otvaranja i zatvaranja blende što kao prednost daje više svjetla na snimkama, tj. polje koje se snima je tada sustavu razumljivije.



*Slika 3.10 Vanjski fiksator Orthofix pripremljen za provedbu eksperimenta aksijalnog opterećenja*

Nakon što se postave svi parametri potrebi za provedbu eksperimenta, najprije se pokrene mjerni sustav pa se tek onda pokrene statička kidalica kako se ne bi dogodio neki propust u prvim trenucima eksperimenta, a koji bi možda kasnije bio bitan kod uspoređivanja rezultata, slika 3.11.



*Slika 3.11 Rezultati snimljenog eksperimenta aksijalnog opterećenja*

Na poslijetku, kada eksperiment završi dostizanjem maksimalnog opterećenja od 1000 N, statička kidalica se zaustavi te *Aramis* sustav za mjerenje počinje sa fazom proračunavanja dobivenih slika. Ukupan broj slika za eksperiment aksijalnog opterećenja vanjskog fiksatora Orthofix iznosi 73, svaka od slika snimljena je u 1 sekundi, što onda odgovara i vremenu snimanja od 73 sekunde.

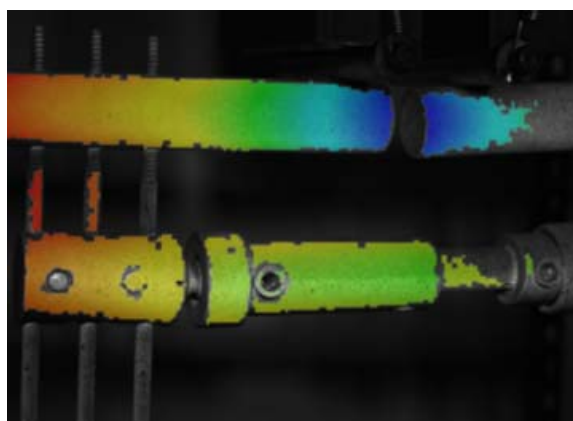
### 3.2 Mjerenje pomaka pri savijanju vanjskog fiksatora *Orthofix*

Vodoravno postavljene unaprijed pripremljene vanjske fiksatore *Orthofix* oslonjene su na krajevima na dva čvrsta oslonca. Položaj modela za vrijeme mjerenja i način opterećivanja prikazan je na slici 3.12. Pošto je cijeli sustav stabilan, eksperiment započinje također okvirnim izračunom potrebnog broja slika da se cijelo mjerenje uspije snimiti, te postavljanjem vremena otvaranja i zatvaranja blende. Postupak je vrlo sličan onom kod aksijalnog opterećenja, pa je i brzina opterećivanja ista, razlika je jedino u visini opterećenja koje u ovom slučaju iznosi od 50 N do 250 N.



*Slika 3.12 Vanjski fiksator Orthofix pripremljen za provedbu eksperimenta savijanja*

Pri završetku eksperimenta, dobivene se slike pohranjuju te se spremaju za fazu proračuna i dobivanja rezultata. Ukupan broj slika u ovom eksperimentu iznosi 73, te ukupno vrijeme trajanja eksperimenta 73 sekunde, slika 3.13.

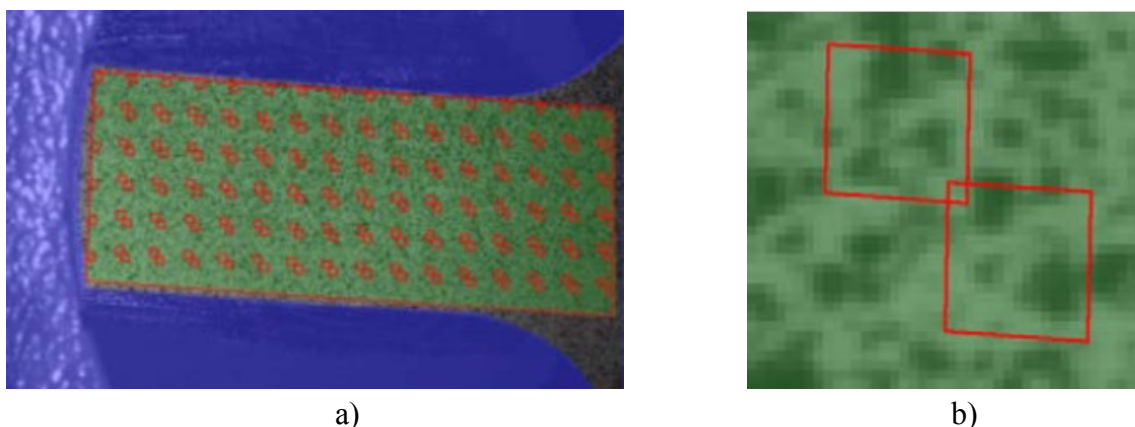


*Slika 3.13 Rezultati snimljenog eksperimenta savijanja*

### 3.3 Obrada slike i dobivanje rezultata

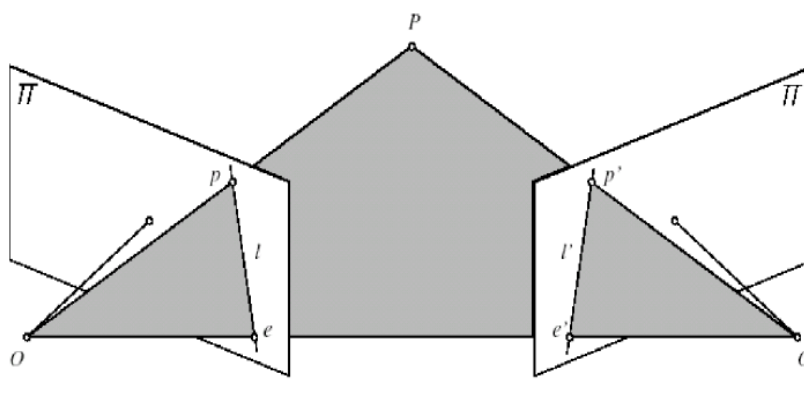
Nakon provedenog eksperimenta, slijedi obrađivanje slika dobivenih tokom snimanja eksperimenta. Obrada slike je relativno kompleksan proces, i zahtjeva predznanje korisnika koji po određenim metodama, sa ciljem kakve rezultate želi iz snimljenih slika dobiti, koristeći se alatima iz programa sustava, zna doći do željenih rezultata.

Na početku obrađivanja slika, u načinu rada izračunavanja, unutar programa sustava, tzv. *Computation mode*, potrebno je zadati dimenziju faseta i udaljenost dvije susjedne fasete, slika 3.14. Fasete se koriste kao područja, najčešće kvadratna, s kojima sustav pretražuje cijelo područje slike, prepoznaje područja, prema prepoznatljivim područjima zbog stohastičnog rastera, u jednoj i drugoj kameri te ta područja povezuje i stvara jednu cjelinu. Metoda kojom uređaj to radi zove se metoda epipolarne ravnine.



Slika 3.14 Područje faseta (a) i dvije susjedne fasete (b) [14]

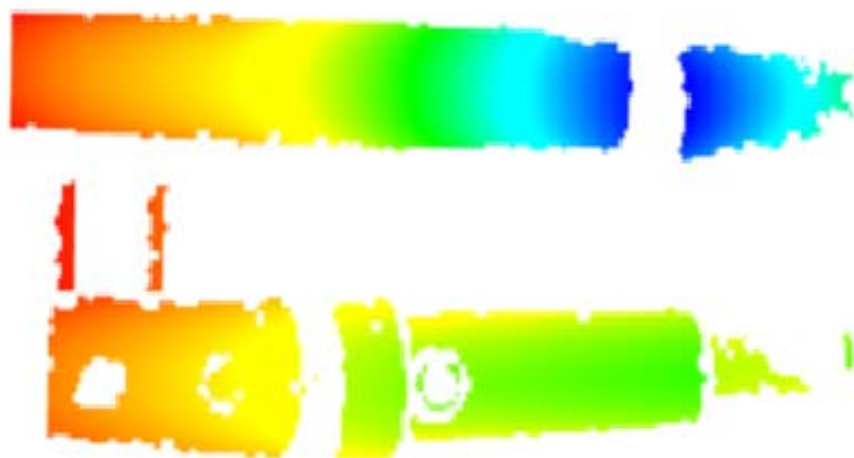
Geometrijska predefiniranost [17] sustava dviju kamera može se iskoristiti za rješavanje problema jednoznačnosti, odnosno pronalaženje slikovne koordinate neke mjerne točke u drugoj kameri korištenjem principa epipolarne ravnine. Radi se o proceduri neovisnoj o promatranom mjernom objektu a koja ovisi o unutrašnjim parametrima kamere i njihovoj relativnoj orijentaciji. Prema slici 3.15, neka se položaj [18,19] objektna točke P preslikan u lijevoj kameri  $II$  nalazi u točki p. Točke O i O' predstavljaju poznata projekcijska središta lijeve, odnosno desne kamere (poznati su vanjski parametri orijentacije kamere  $\mathbf{R}$  i  $\mathbf{t}$ ). Položaj slikovnog osjeta objektna točke p' u desnoj kameri neka je pritom nepoznat, što znači da nije zadovoljen uvjet jednoznačnosti. Spoje li se pravcima točke P i O, te točke O i O', dobivena su dva pravca koja leže u istoj ravnini (pravac OO', koji prolazi točkama e, odnosno e' zajednički je svim vidljivim objektnim točkama P). Ravnina koja je ovako definirana u literaturi je poznata kao epipolarna ravnina. Projekcija epipolarne ravnine u lijevu kameru definira epipolarnu liniju l. S obzirom na to da je na početku pretpostavljeno da u desnoj kameri nije poznato gdje se nalazi preslikana točka p', projiciranjem epipolarne ravnine u desnu kameru dobiva se druga epipolarna linija l' na kojoj će po ovoj definiciji morati ležati tražena slikovna točka p'.



Slika 3.15 Epipolarna ravnina [17]

Ovaj će uvjet biti zadovoljen ako se točka  $P$  nalazi u vidnom polju desne kamere i njeni slikovni osjeti ne prolaze točkama  $e$ , odnosno  $e'$ , te ako promatrana objektna točka nije zasjenjena unutar vidnog polja neke od kamera. Tako je, zapravo, korištenjem informacija o poznatom relativnom položaju lijeve i desne kamere problem pronalaženja pripadajućeg para točke  $p$  (tzv. stereopara) u desnoj kameri sveden s ravninskog problema (ravnina slike je dvodimenzionalna) na jednodimenzijски problem traženja točke  $p'$  uzduž epipolarne linije  $l'$  u drugoj kameri.

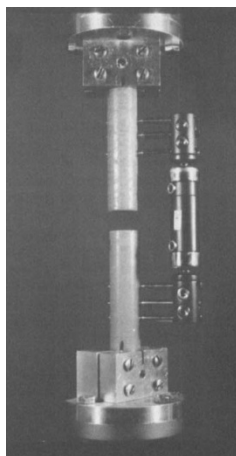
Kada se pronađu sve početne fasete, tzv. *Start point*, a one se traže na svim dijelovima slike na kojima nas zanima krajnji rezultat, tada se sustavu naredi izračunavanje. Kada izračunavanje završi dobiva se neka vrsta modela u 3D-u, slika 3.16, u obliku mreže površinskih konačnih elemenata kojima se može vidjeti dubina. Sustav automatski prebacuje u način rada za dobivanje rezultata, *Evaluation mode*. Iz te dobivene mreže tada se mogu dobiti svi željeni podaci, o pomacima, deformacijama u svim osima, brzinama i drugim željenim veličinama.



Slika 3.16 Mreža faseta koje opisuju geometriju snimanog modela vanjskog fiksatora Orthofix opterećenog na savijanje

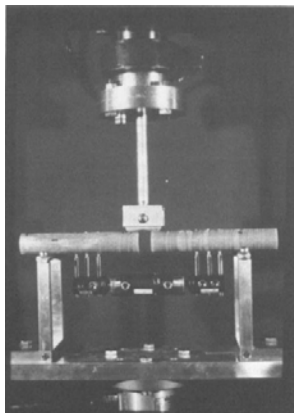
#### 4. Simulacija aksijalnog i savojnog opterećenja

Simulacija sklopa provedena je u programskom paketu *Abaqus*. Aksijalna i savojna opterećenja postavljani su prema tome kako izgleda prihvat i opterećenje vanjskog fiksatora *Orthofix* na statičkoj kidalici. Modeli *Orthofix*-a i nove konstrukcije vanjskog fiksatora izrađeni su u programskom paketu *ProEngineer*, te su iz njega prebačeni u *Abaqus* u obliku .STEP podatka. Simulacija aksijalnog opterećenja postavljena je prema izvedbi eksperimenta aksijalnog opterećivanja vanjskog fiksatora, slika 4.1, na način da se mjerni objekt, u ovome slučaju model za simulaciju, uklješti na donjem kraju jedne epruvete dok se druga epruveta opterećuje s različitim opterećenjima u smjeru osi epruveta.



Slika 4.1 Eksperiment aksijalnog opterećivanje modela [20]

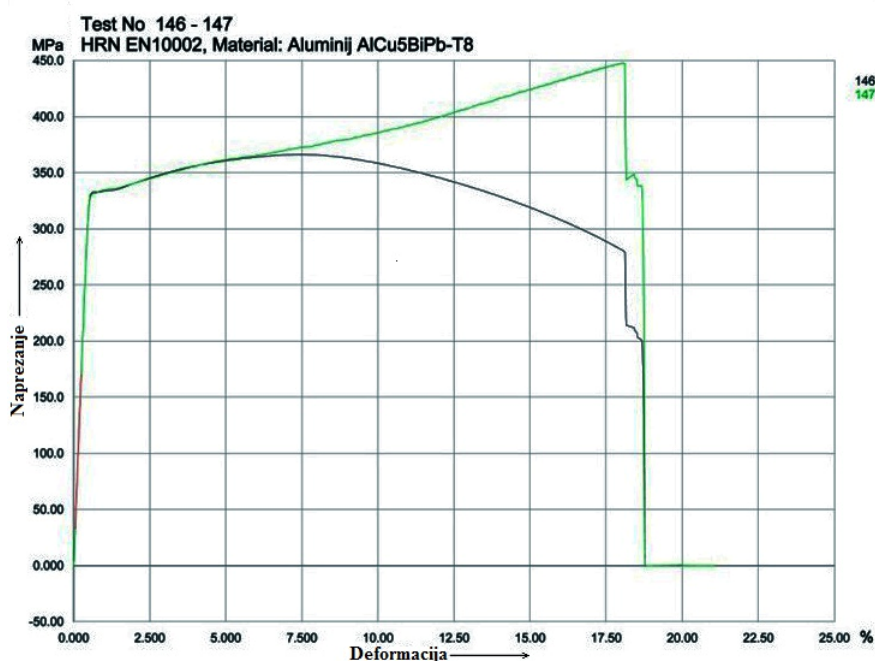
Simulacija savijanja, slika 4.2, približno izgleda isto kao i simulacija aksijalnog opterećenja, jedina je razlika u tome što je model drukčije uklješten i opterećen. Simulacija je provedena za 5 različitih nivoa opterećenja, od 50 N pa do 250 N. Model je uklješten na krajevima epruveta, ovaj puta u horizontalnom položaju vanjskog fiksatora, dok je opterećenje postavljeno na bokove vrhova epruveta, slika 4.2.



Slika 4.2 Eksperiment savijanja modela [20]

## 4.1 Priprema modela *Orthofix* za simulaciju aksijalnog opterećenja

Model je najprije potrebno importirati u programski paket *Abaqus*. Tako dobivenom modelu potrebno je zadati mehanička svojstva, svakom dijelu sklopa zasebno. Pošto sama konstrukcija sadrži dijelove od različitih materijala, u *Abaqus*-u je potrebno to i definirati pod alatom *Property* -> *Create Material*. Podatke za materijale, medicinski čelik, politetilen te aluminij u ovom slučaju, potrebno je isčitati iz postojećih dijagrama  $\sigma$ - $\epsilon$  dobivenih statičkim vlačnim pokusom na epruvetama iz tih materijala, ili je potrebno podatke uzeti iz literature. U ovom slučaju podaci za materijale uzeti su iz dijagrama koji su dobiveni ispitivanjem epruveta od tih materijala, slika 4.3, u laboratoriju za eksperimentalnu mehaniku, Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

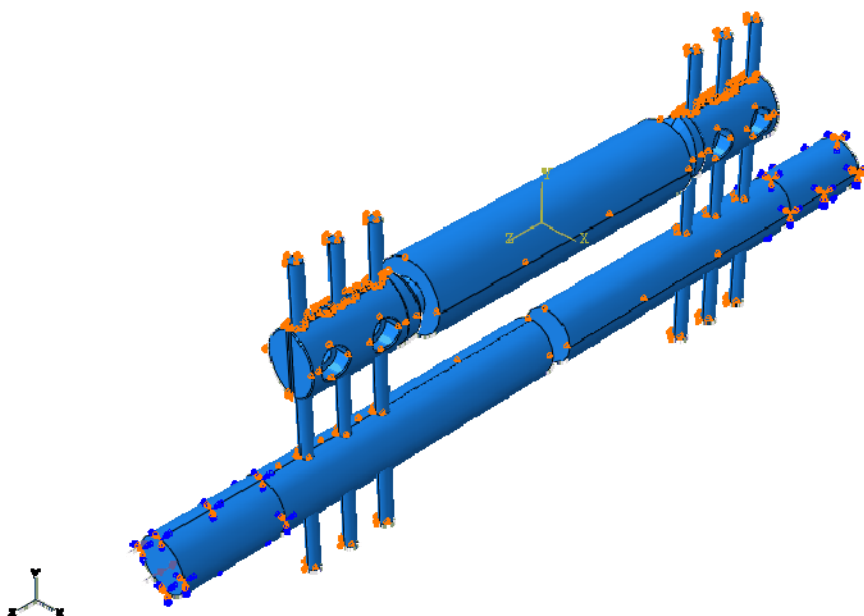


Slika 4.3 Primjer dijagrama  $\sigma$ - $\epsilon$  aluminija AlCu5BiPb-T8 za dobivanje podataka o plastičnim i elastičnim mehaničkim svojstvima

Nakon što se pridoda mehanička svojstva svakom pojedinom dijelu sklopa, potrebno je zadati međusobne ovisnosti i kontakte među tim dijelovima. Za simulaciju aksijalnog opterećenja, svi kontakti definirani su kao idealno čvrsti, tzv. *Tie* kontakt, *Surface to surface*. Takva vrsta veze omogućuje postavljanje modela u najkritičniji slučaj, gdje će se maksimalno opteretiti dijelovi, te će se vidjeti koji dio ne može podnijeti ta opterećenja, i što bi se na njemu moglo promijeniti, ako je uopće potrebno. Kada veza ne bi bila idealno čvrsta, moglo bi kod najkritičnijih opterećenja doći do proklizavanja dijelova, i rasterećenja, kao što se to događa u realnom stanju. To bi isto tako bili dobri rezultati, čak i točniji, ali u ovome slučaju je ipak bitnije da se cijeli

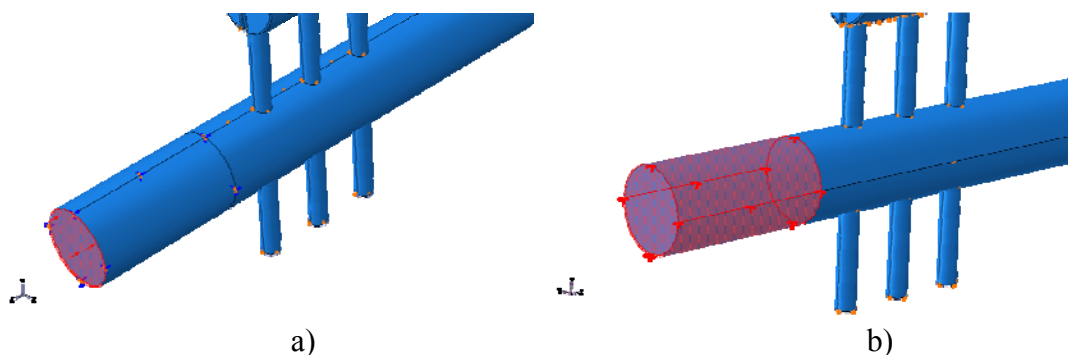


sustav stavi u najkritičniju zonu, kako bi se takav slučaj izbjegao prilikom korištenja vanjskog fiksatora u svakodnevnoj praksi.



*Slika 4.4 Postavljanje kontakata u modelu za simulaciju aksijalnog opterećenja*

Kako bi simulacija bila provediva na modelu je potrebno zadati rubne uvjete, slika 4.4. Uklještjenje sklopa, slika 4.5, zadaje se na mjestu gdje donja čeljust statičke kidalice drži cijeli sklop za jednu od epruveta. Na gornjem dijelu gdje čeljust kidalice također pridržava cijeli sklop definira se tlačno opterećenje iznosa 250, 500, 750 i 1000 N. Na tom mjestu dozvoljeni su pomaci samo u smjeru uzdužne osi epruvete.

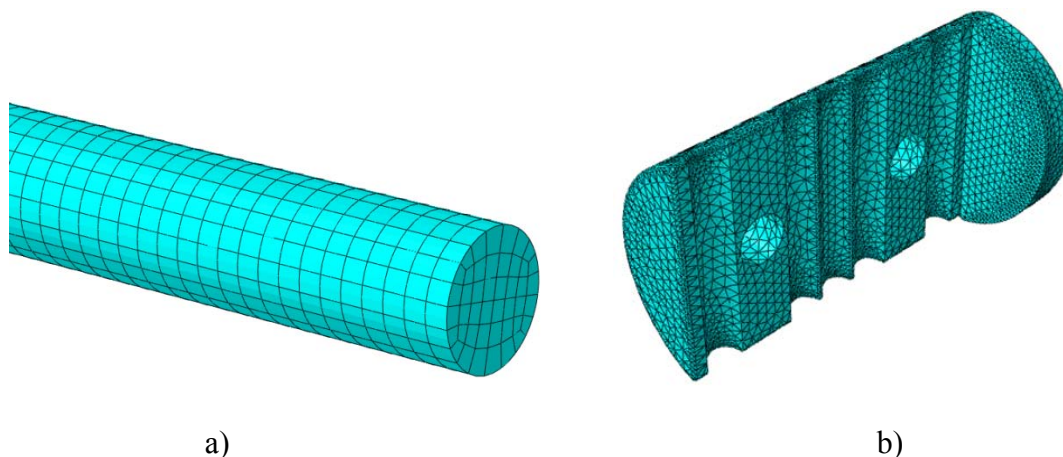


*Slika 4.5 Aksijalno opterećen sklop (a) i uklještjenje modela (b)*

Svako od navedenog opterećenja je zasebna simulacija, iz kojih su dobiveni rezultati kao što su veličine naprezanja, pomaci i sl. Cijeli sklop je također ograničen u smjeru osi uzduž vijaka. Kada su definirani rubni uvjeti ograničenja, mehanička svojstva modela i opterećenje na modelu, tada generira mreža konačnih elemenata. Program će svaki pojedini dio cijelog sustava podijeliti



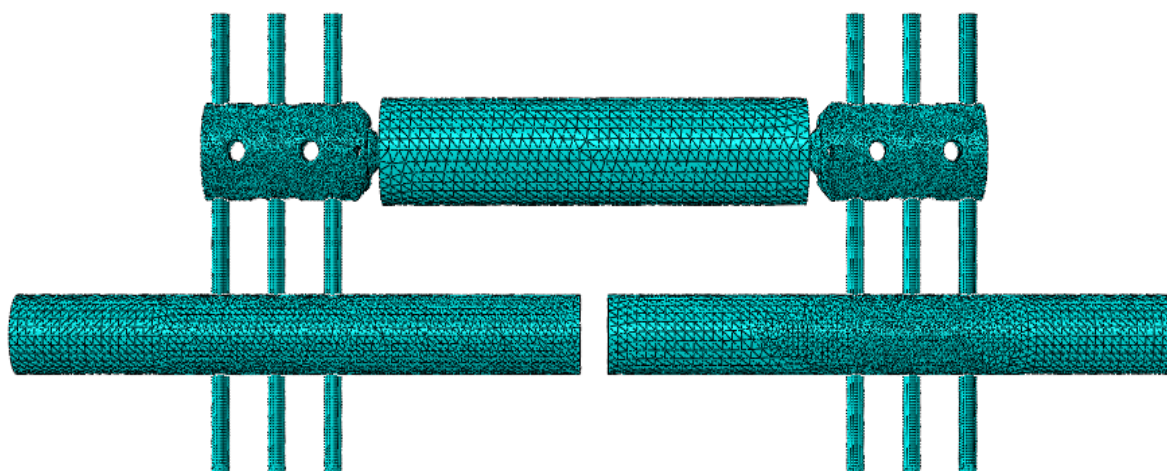
na određeni broj konačnih elementa, koji su odabrani ovisno o vrsti geometrije. Prilikom zadavanja veličine i vrste elemenata potrebno je posebno paziti da se povećanjem broja elemenata povećava i ukupno vrijeme proračuna, tako da je najbolje krenuti s manjim brojem, pa napraviti 2 ili 3 simulacije više, s povećanjem broja elemenata kako bi se moglo vidjeti kojem krajnjem rezultatu konvergira rješenje. Za vijke, pošto su cilindričnog oblika, program *Abaqus* prepoznaje geometriju te daje mogućnost odabira heksaedarskih konačnih elemenata drugog reda, slika 4.6.



Slika 4.6 Heksaedarski konačni elementi (a) i tetraedarski konačni elementi (b)

Ostali dijelovi sklopa, *Abaqus*-u ne poznate geometrije, podijeljeni su u tetraedarske konačne elemente, također drugog reda.

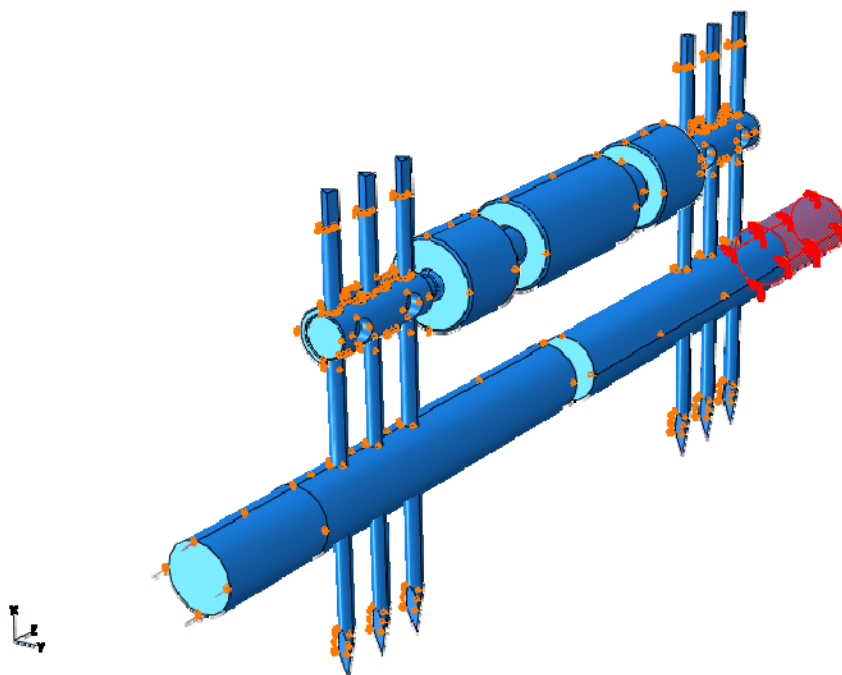
Cijeli sklop nakon zadavanja ograničenja i podjele na konačne elemente opisan je sa 608014 elemenata te 1040515 čvorova, slika 4.7.



Slika 4.7 Mreža konačnih elemenata generirana na modelu za simulaciju aksijalnog opterećenja vanjskog fiksatora Orthofix

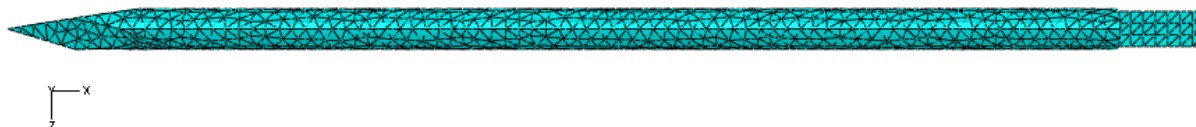
## 4.2 Priprema modela nove konstrukcije vanjskog fiksatora za simulaciju aksijalnog opterećenja

Postupak koji je korišten za pripremu modela vanjskog fiksatora *Orthofix* ostaje isti i kod pripreme modela nove konstrukcije vanjskog fiksatora. Mora se paziti da konačan broj elemenata bude približno jednak broju elemenata kod vanjskog fiksatora *Orthofix* kako bi dobiveni rezultati mogli biti usporedivi. U slučaju nove konstrukcije aluminij je u potpunosti izbačen te su svi dijelovi izrađeni od medicinskog čelika. Rubni uvjeti su također postavljena na epruvetama, te uzduž cijelog modela. Model je opterećen kao i model *Orthofix*, te je uklještenje također postavljeno na jednu od epruveta.



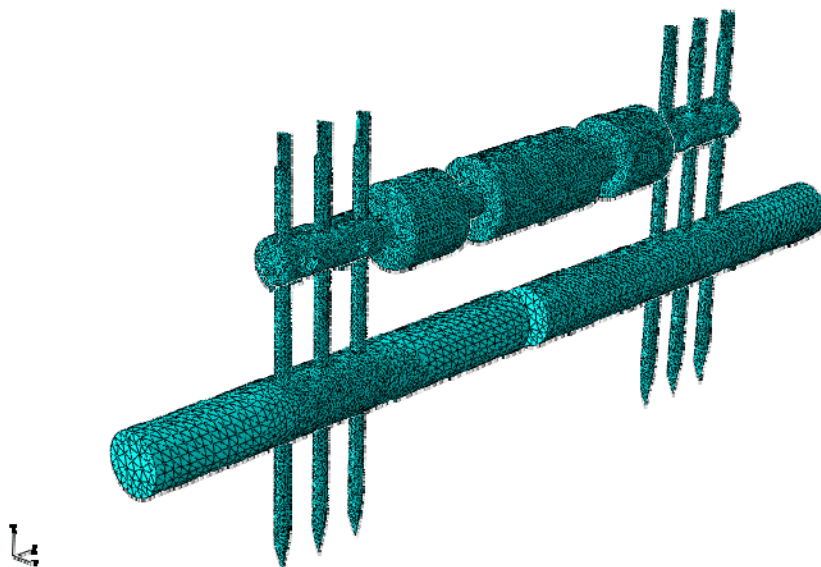
Slika 4.8 Rubni uvjeti i opterećenje modela nove konstrukcije vanjskog fiksatora

Mreža konačnih elemenata postavlja se također prema geometriji no u ovom slučaju ni jednom dijelu sklopa Abaqus ne prepoznaje geometriju, tako da su svi opisani mrežom tetraedarskih elemenata drugog reda, slika 4.9.



Slika 4.9 Vijak modela nove konstrukcije vanjskog fiksatora – tetraedarska mreža drugog reda

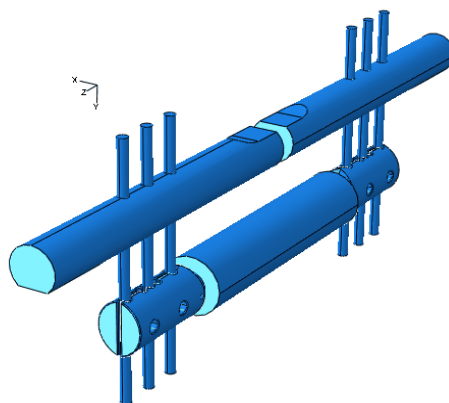
Nakon što je na svim dijelovima modela generirana mreža konačnih elemenata, ukupan broj konačnih elemenata modela nove konstrukcije vanjskog fiksatora iznosio je 450445, dok je broj čvorova bio 679111, slika 4.10.



*Slika 4.10 Mreža konačnih elemenata pripremljena za simulaciju aksijalnog opterećenje nove konstrukcije vanjskog fiksatora*

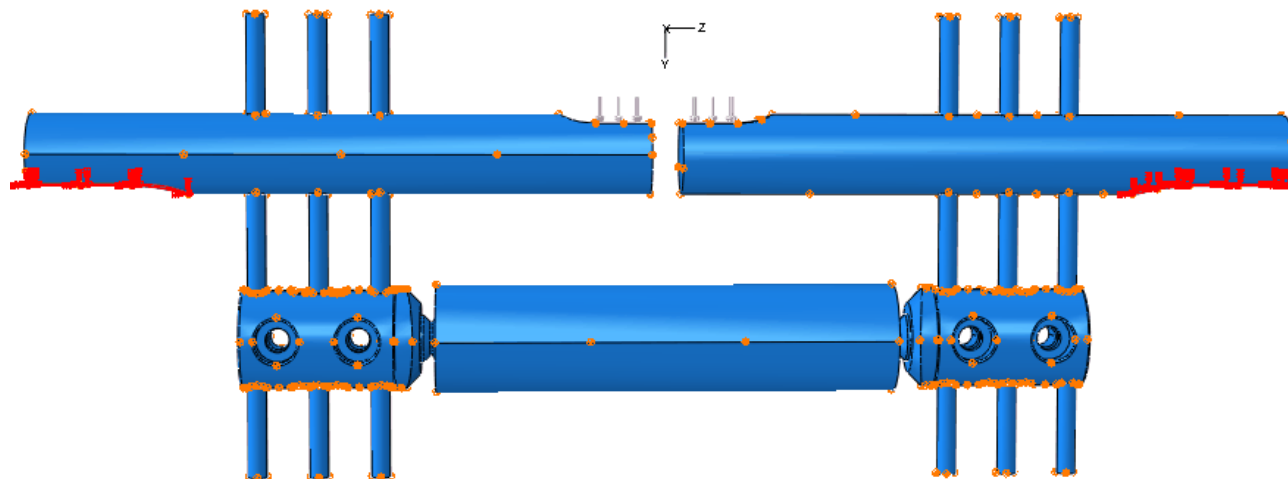
### 4.3 Priprema modela *Orthofix* za simulaciju savijanja

Na samome početku potrebno je importirati model *Orthofix*-a koji je u programu ProEngineer pripremljen za simulaciju savijanja, slika 4.11. Ponovno je potrebno postaviti mehanička svojstva svim djelovima modela, te je potrebno zadati rubne uvjete, veze i opterećenja.



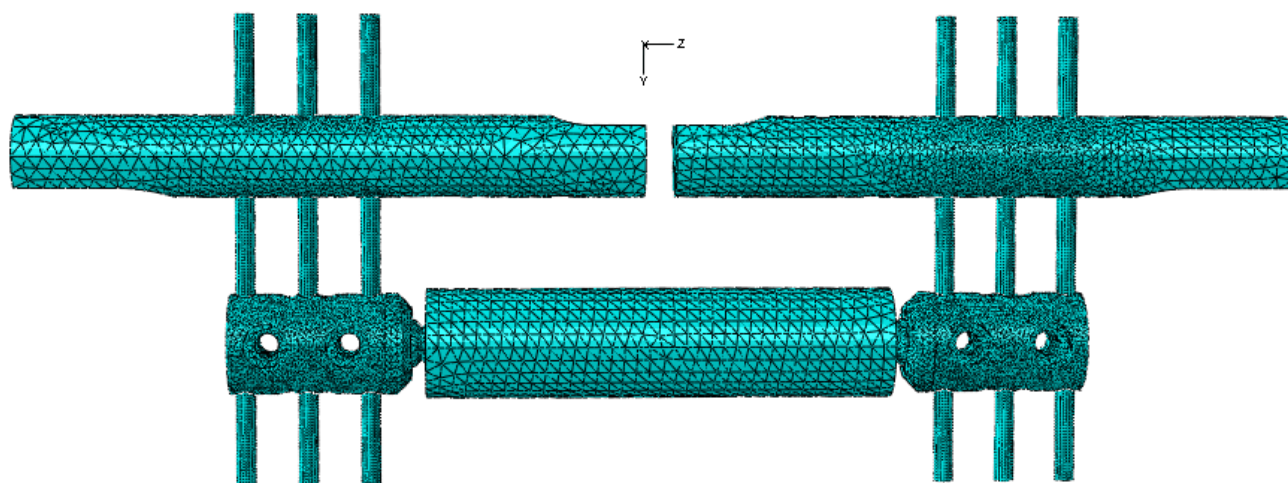
*Slika 4.11 Model Orthofix pripremljen za simulaciju savijanja*

Krajevi epruveta oslonjeni su na čvrsti oslonac, dok se sredina epruveta opterećuje. Svi kontakti su i u ovom slučaju idealno čvrsti, *Tie -> Surface to surface*, te je model također ograničen dozvoljenim pomakom jedino u smjeru osi uzduž epruveta i uzduž vijaka, slika 4.12.



*Slika 4.12 Rubni uvjeti, uklještenje i opterećenje modela Orthofix pripremljenog za simulaciju savijanja*

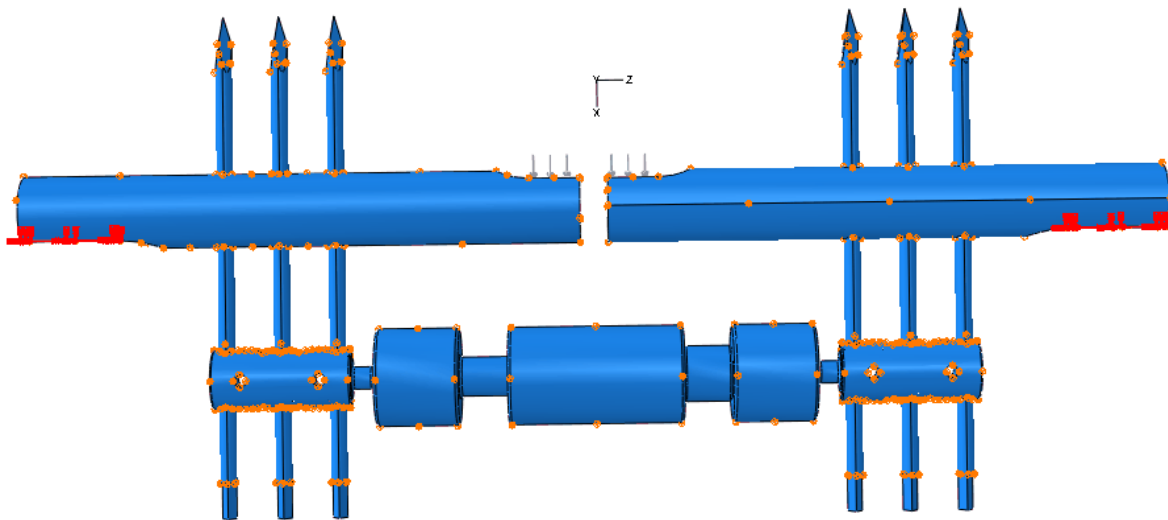
Model je na kraju pripreme opisan mrežom konačnih elemenata koja ne izlazi iz okvira mreže konačnih elemenata kod aksijalnog opterećenja. Razlika je u tome što su kod ove mreže mjesta gdje se očekuje veća promjena druga, a na njima je mreža pogošćena. Na kraju model sadržava 353829 konačnih elemenata i 673453 čvorova, slika 4.13.



*Slika 4.13 Mreža konačnih elemenata pripremljena za simulaciju savijanja za model Orthofix*

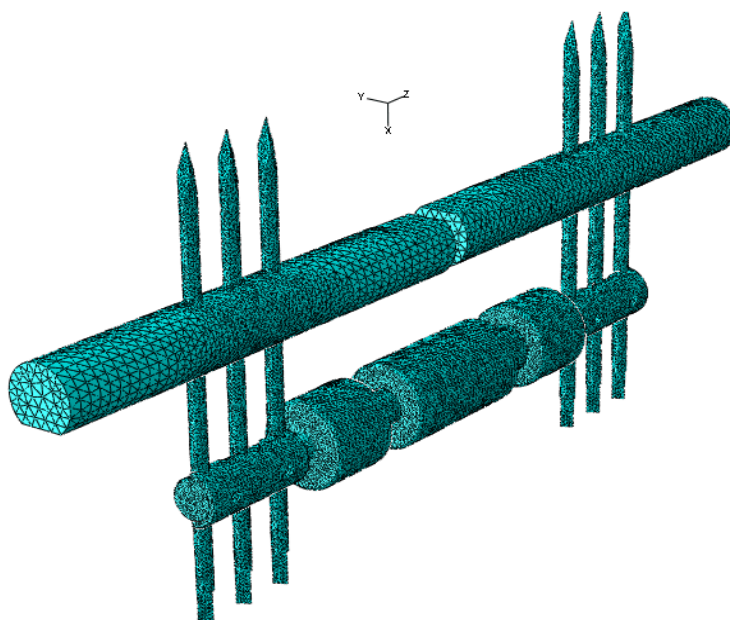
#### 4.4 Priprema modela nove konstrukcije vanjskog fiksatora za simulaciju savijanja

Na modelu se zadaju rubni uvjeti i opterećenja, slika 4.14, te se generira mreža konačnih elemenata kao u predhodnom slučaju.



*Slika 4.14 Priprema modela nove konstrukcije vanjskog fiksatora*

Nakon generiranja mreže konačnih elemenata, ukupan broj elemenata iznosio je 447391, dok je ukupan broj čvorova 678981, slika 4.15.



*Slika 4.15 Mreža konačnih elemenata modela nove konstrukcije vanjskog fiksatora*

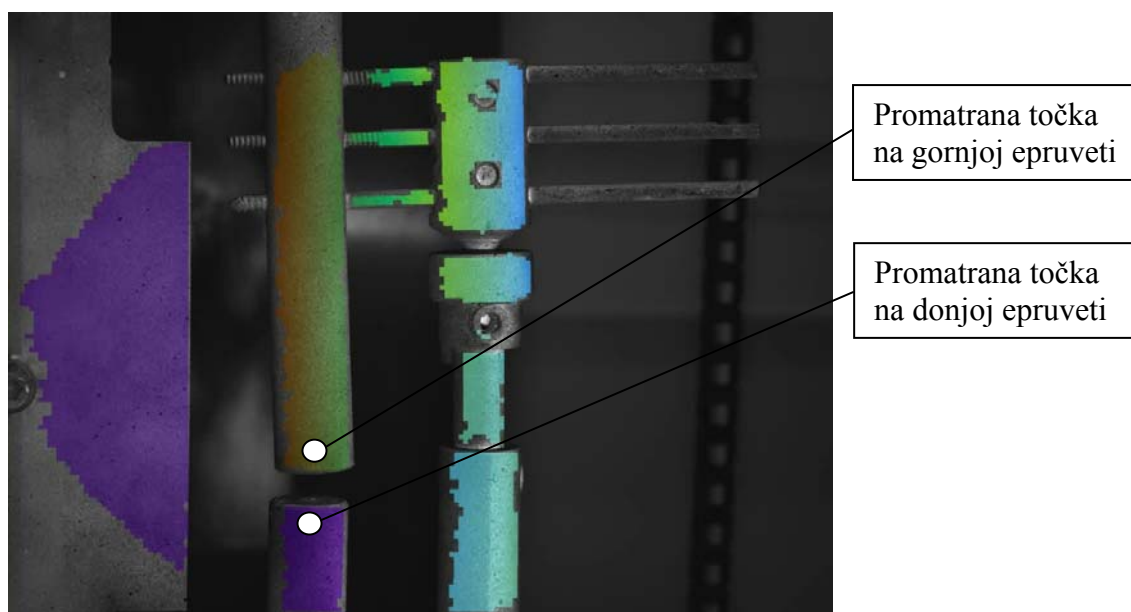


## 5. Rezultati dobiveni provedbom eksperimenta i simulacije modela

Na samom kraju istraživanja potrebno je usporediti podatke dobivene simulacijama modela u programskom paketu *Abaqus*, te provedbom eksperimenta. Pretpostavka je da se rezultati neće potpuno poklapati ali da će biti istih karaktera i malog odstupanja kako bi se mogli usporediti. Osnovni razlog nepoklapanja rezultata jeste taj što su modeli za provedbu simulacije pojednostavljeni, izbačeni su manji dijelovi poput vijaka i spojnice koji nisu bili toliko interesantni za uspoređivanje a znatno bi otežali provedbu same simulacije i produljili vrijeme trajanja izračunavanja. Drugi isto tako bitni razlog je taj što su se u simulaciji koristile idealno čvrste veze kako bi se također smanjila kompleksnost samog modela, ta kako bi se moglo dobio uvid u to kako bi se pojedini dijelovi sklopa ponašali u tim kritičnim slučajevima.

### 5.1 Rezultati eksperimenta aksijalnog opterećenja vanjskog fiksatora *Orthofix*

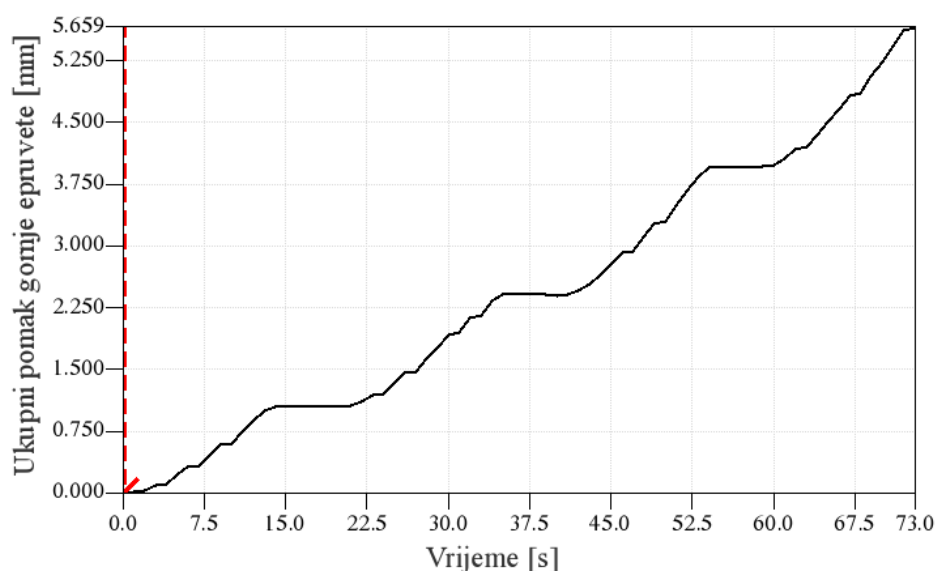
Na slici 5.1 prikazani su pomaci faseta koje opisuju geometriju modela vanjskog fiksatora *Orthofix* opterećenog aksijalno, odnosno stvarne pomake epruveta i fiksatora. Na slici lijevo je vidljiv i referentni objekt koji nije bio opterećivan tokom provođenja eksperimenta, te su svi pomaci promatrani u odnosu na njega kako bi se izbjegao utjecaju vanjskih poremećaja.



Slika 5.1 Ukupni pomaci vanjskog fiksatora *Orthofix* djelovanjem aksijalnog opterećenja

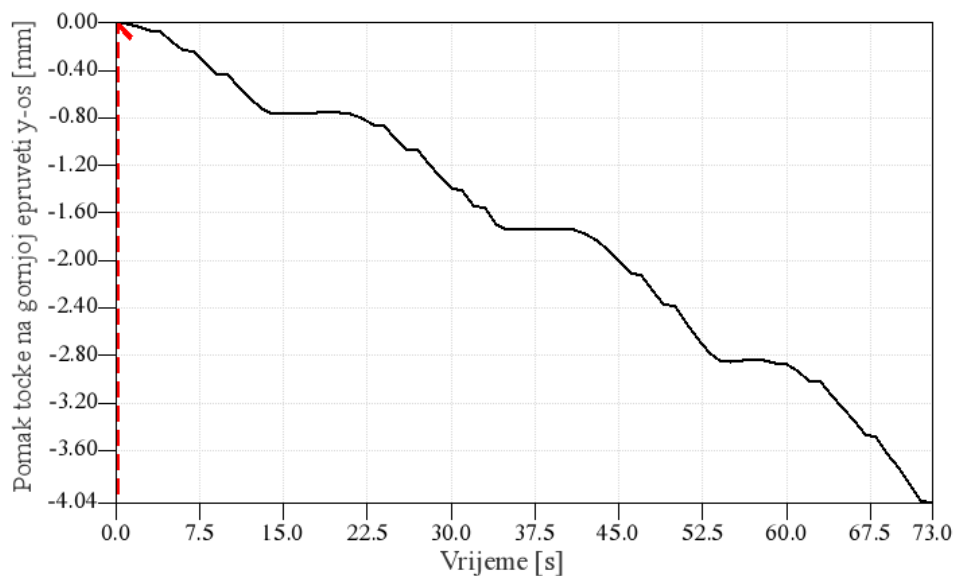
Na slici 5.2 prikazan je dijagram ukupnih pomaka gornje epruvete kao funkcija vremena opterećivanja. Dijelovi gdje se javlja konstantan pomak u vremenu jesu dijelovi dosezanja granica opterećenja od 250 N, 500 N, 750 N te 1000 N. Može se vidjeti da se za 250 N gornja epruveta pomakla za 1.125 mm. Kod 500 N ona se pomakla za nešto više od 2.250 mm, kod 750

N za 3.750 mm te na kraju kod maksimalnog opterećenja od 1000 N taj pomak iznosi 5.659 mm. Ukupni pomak označava pomak u smjeru svih osi, odnosno rezultantni pomak.



*Slika 5.2 Ukupni pomak gornje epruvete pri aksijalnom opterećenju vanjskog fiksatora Orthofix*

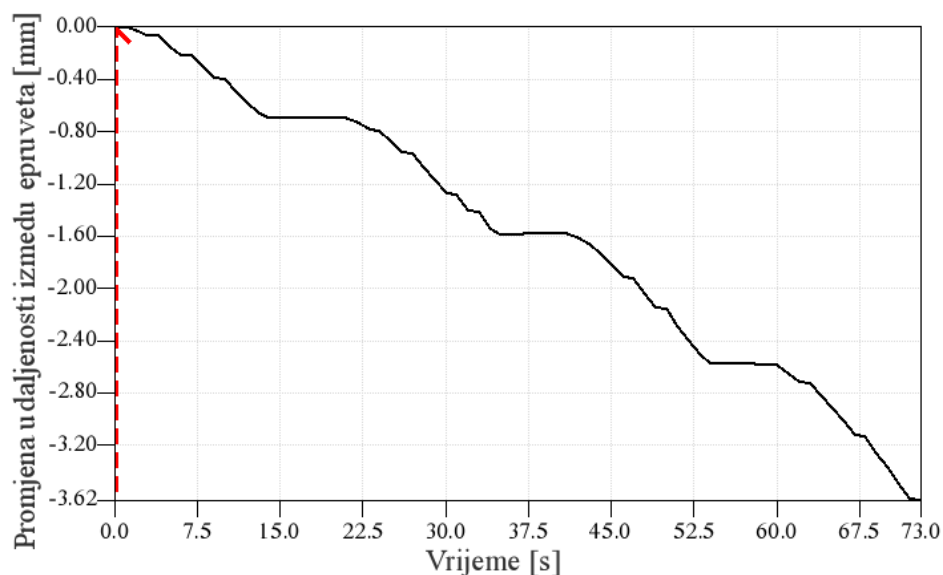
Na slijedećoj slici, slika 5.3, može se vidjeti pomak po osi y, uzduž epruveta, koji pokazuje spuštanje epruvete prema dolje te približavanje donjoj epruveti.



*Slika 5.3 Pomak gornje epruvete u smjeru y-osi pri aksijalnom opterećenju vanjskog fiksatora Orthofix*

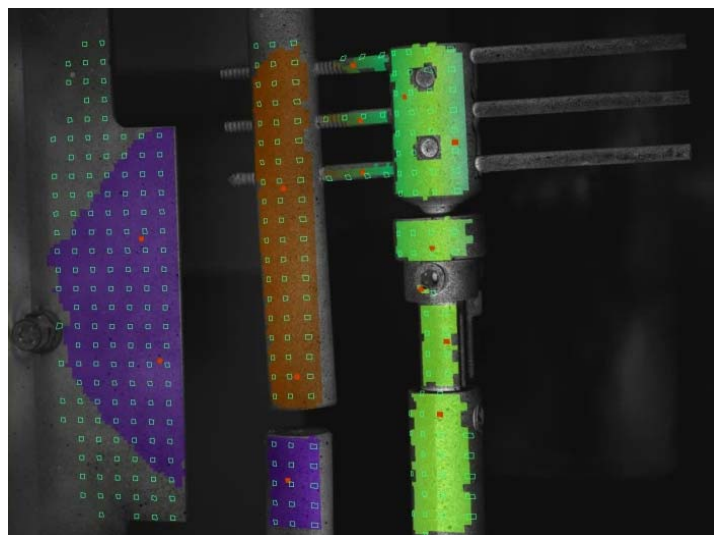
Dijagram na slici 5.4 prikazuje razliku udaljenosti gornje i donje epruvete od početnih 10 mm. Može se vidjeti da su epruvete pri 250 N razmaknute za 9.3 mm, pri 500 N za 8.4 mm, pri 750 N

za 7.3 mm te za 1000 N razmak epruveta iznosi 6.38 mm tj. promjena razmaka pri 1000 N je 3.8 mm.



*Slika 5.4 Promjena razmaka između donje i gornje epruvete pri aksijalnom opterećenju vanjskog fiksatora Orthofix*

Mreža faseta pri 1000 N, slika 5.5, pokazuje da je pri najvećem opterećenju došlo do progiba cijelog vanjskog fiksatora. Taj progib nije velik ali bi pri korištenju mogao izazvati probleme, i dovesti do ugrožavanja pacijenta jer postoji mogućnost loma ili odvajanja dijelova te havarije cijele konstrukcije. To svakako pokazuje da vanjski fiksator orthofix nije namjenjen za veća opterećenja koja su približno iznosa od 1000 N.

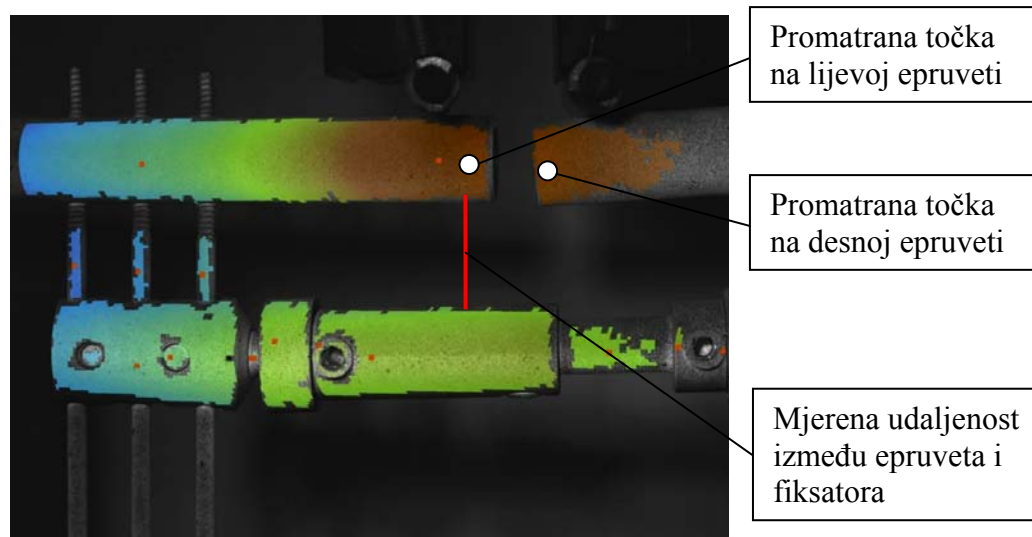


*Slika 5.5 Pomaci vanjskog fiksatora Orthofix pri aksijalnom opterećenju od 1000 N s prikazanim fasetama*



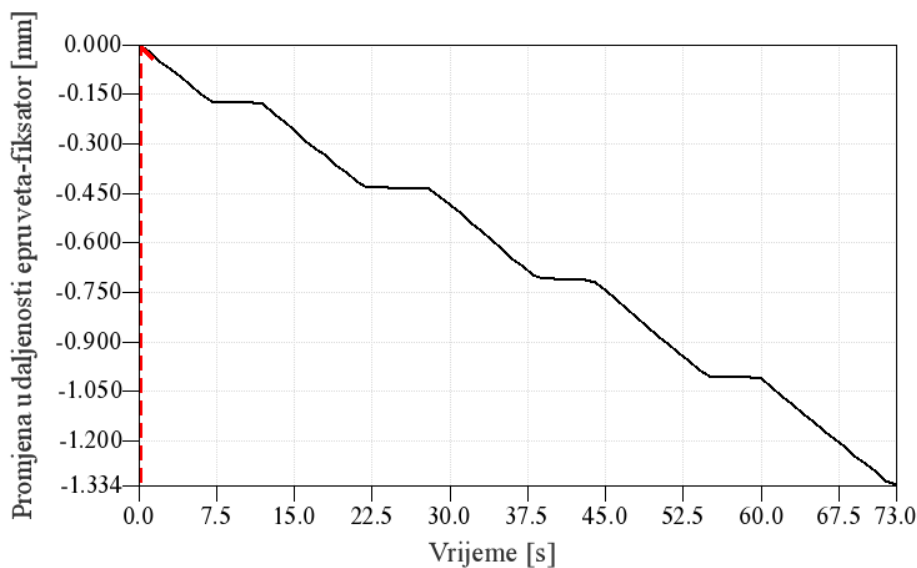
## 5.2 Rezultati eksperimenta savijanja vanjskog fiksatora *Orthofix*

Konstrukcija je postavljena vodoravno, oslonjena krajevima epruveta na nosače, u statičku kidalicu. Sila se preko dva oslonca prenosi na konstrukciju te se jedna polovica narinute sile prenosi na lijevu epruvetu, a druga se polovica sile prenosi na desnu epruvetu, pošto je sustav simetričan, kao što je prikazano na slici 5.6.



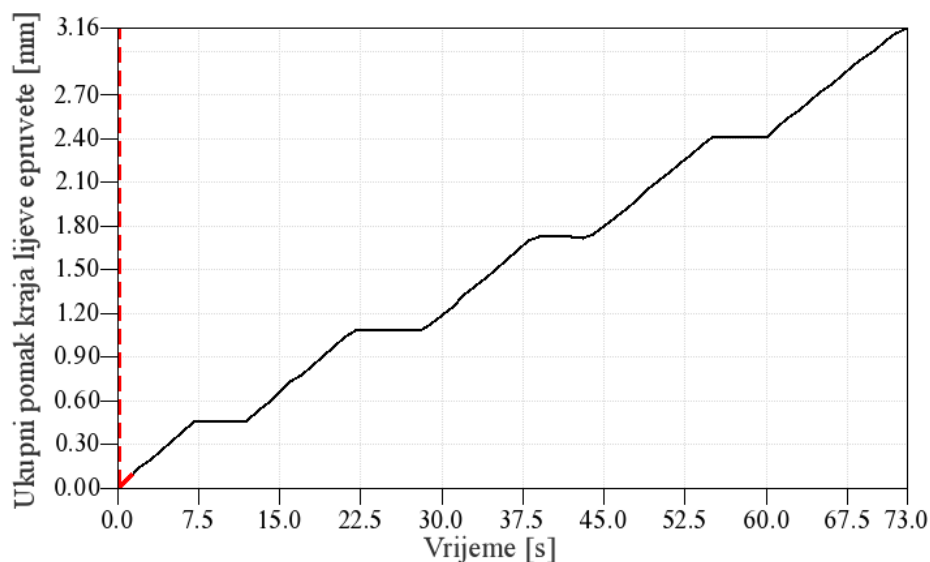
Slika 5.6 Rezultat snimanja savijanja vanjskog fiksatora *Orthofix* pri maksimalnom opterećenju od 250 N

Slika 5.7 prikazuje dijagram promjene udaljenosti epruvete i fiksatora. Pri 50 N se epruvete približe fiksatoru za 0.15 mm, dok se pri konačnih 250 N približe za 1.3 mm.



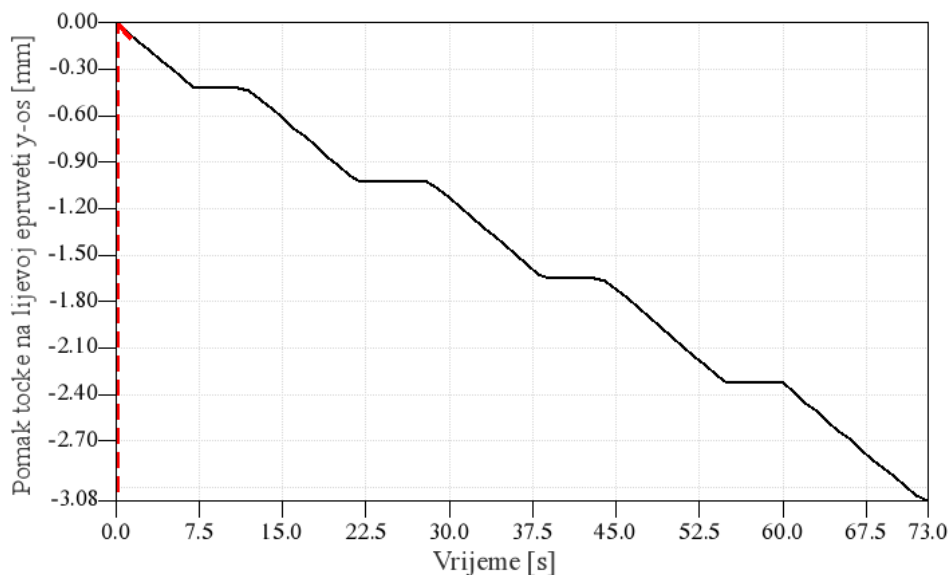
Slika 5.7 Pomak epruveta prema vanjskom fiksatoru *Orthofix* za eksperiment savijanja kod maksimalnih 250 N

Ukupan pomak točke mjerene na kraju lijeve epruvete za 50 N iznosi 0.45 mm prema dijagramu sa slike 5.8. Za 100 N ukupan pomak iznosi 1 mm, za 150 N 1.7 mm, za 200 N 2.25 mm te za krajnjih 250 N ukupni pomak epruvete je 3.16 mm.



*Slika 5.8 Ukupni pomak točke na lijevoj epruveti vanjskog fiksatora Orthofix za eksperiment savijanja do maksimalnih 250 N*

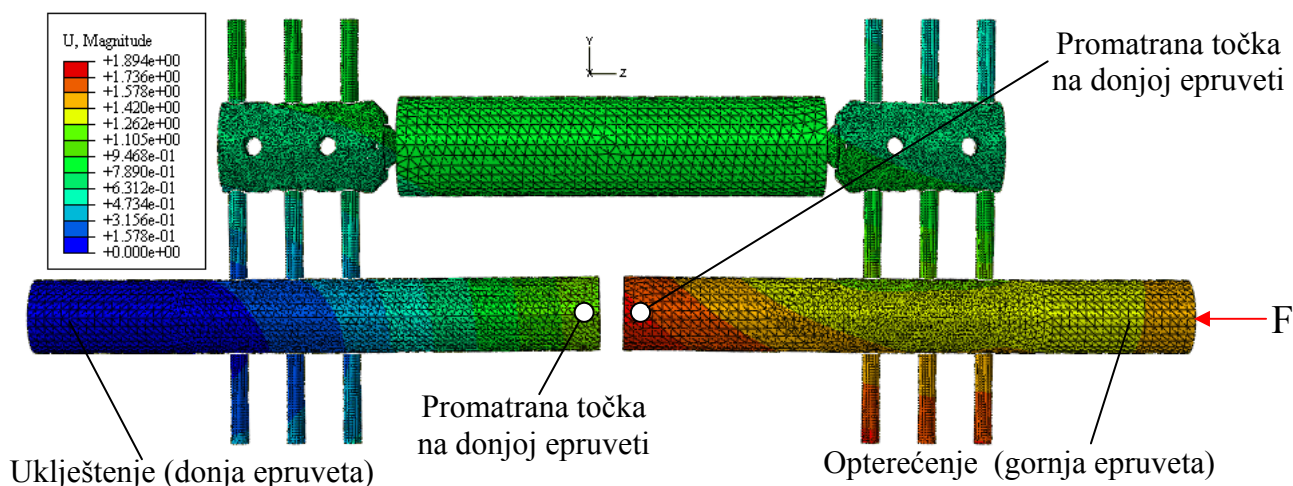
Pomak te iste točke po osi y, uzduž vijaka, prema dijagramu sa slike 5.9 za opterećenje od 50 N iznosi 0.45 mm u negativnom smjeru, za 100 N iznosi 1 mm, za 150 N 1.7 mm te za 200 N iznosi 2.5 mm.



*Slika 5.9 Pomak točke u smjeru y-osi na lijevoj epruveti vanjskog fiksatora Orthofix za eksperiment savijanja do maksimalnih 250 N*

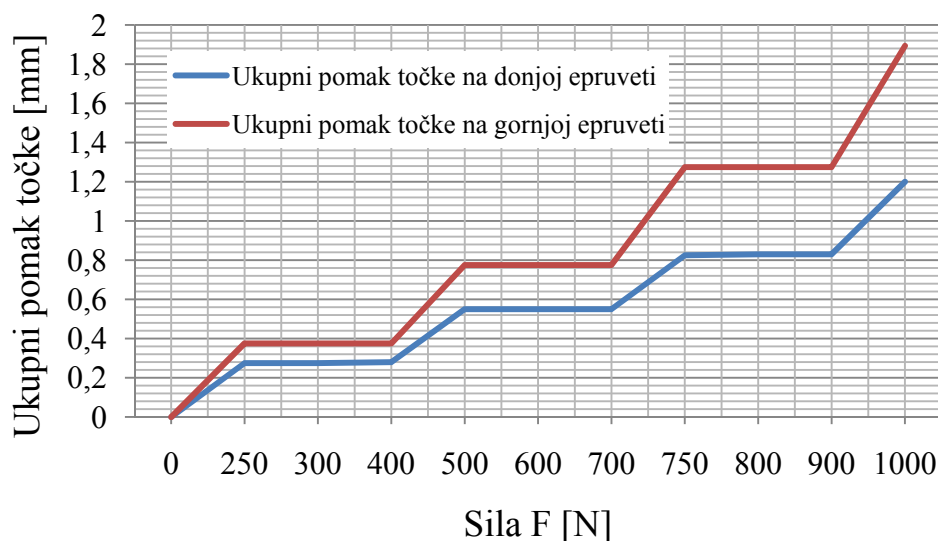
### 5.3 Rezultati dobiveni simulacijom aksijalnog opterećenja vanjskog fiksatora Orthofix

Provedena simulacija pokazuje slijedeće. Pri najmanjih 250 N ukupni pomak gornje epruvete, koja se opterećuje aksijalno u smjeru uzdužne osi epruveta, iznosi 0.375 mm. Pri opterećenju od 500 N ta ista točka se ukupno pomakne za 0.775 mm, pri 750 N se pomakne za 1.275 mm te se za maksimalnih 1000 N točka pomakne za 1.894 N, slika 5.10.



Slika 5.10 Ukupni pomak donje epruvete vanjskog fiksatora Orthofix opterećenog aksijalno silom od 1000 N

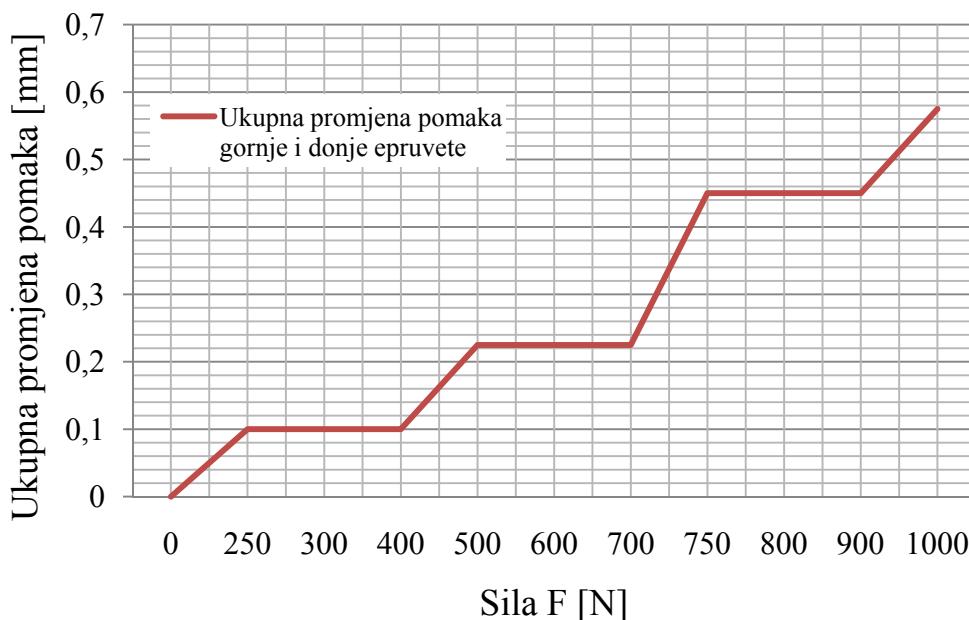
Dobiveni podaci prikazani su na slici 5.11 u dijagramu ukupnih pomaka točaka na gornjoj i donjoj epruveti.



Slika 5.11 Ukupni pomak mjerenih točaka na gornjoj i donjoj epruveti vanjskog fiksatora Orthofix opterećenog aksijalno silom do 1000 N

Prema dijagramu sa slike 5.11 slijedi da je ukupni pomak točke na donjoj epruveti za opterećenje silom od 250 N 0.275 mm. Za silu od 500 N taj pomak iznosi 0.55 mm, za 750 N 0.825 mm te za maksimalno opterećenje silom od 1000 N pomak točke na donjoj epruveti iznosi 1.2 mm.

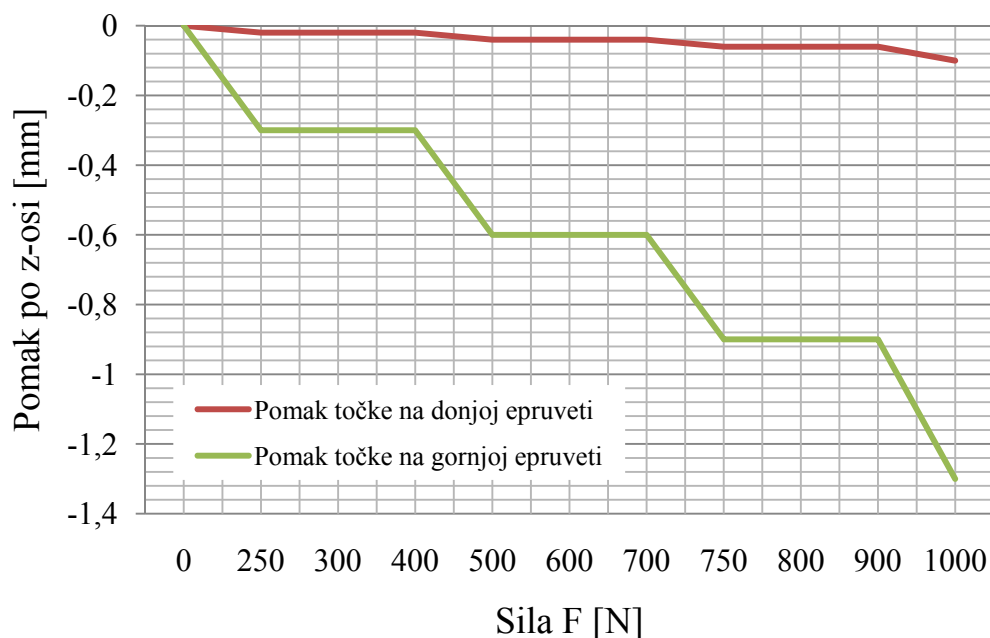
Oduze li se pomak na gornjoj epruveti sa pomakom na donjoj epruveti za svako opterećenje dobiti će se dijagram razlike ukupnih pomaka, koji pokazuje koliko su se epruvete približile jedna drugoj sa početnih 10 mm, slika 5.12.



*Slika 5.12 Promjena ukupnih pomaka mjerenih točki na epruvetama vanjskog fiksatora Orthofix za aksijalno opterećenje silom do 1000 N*

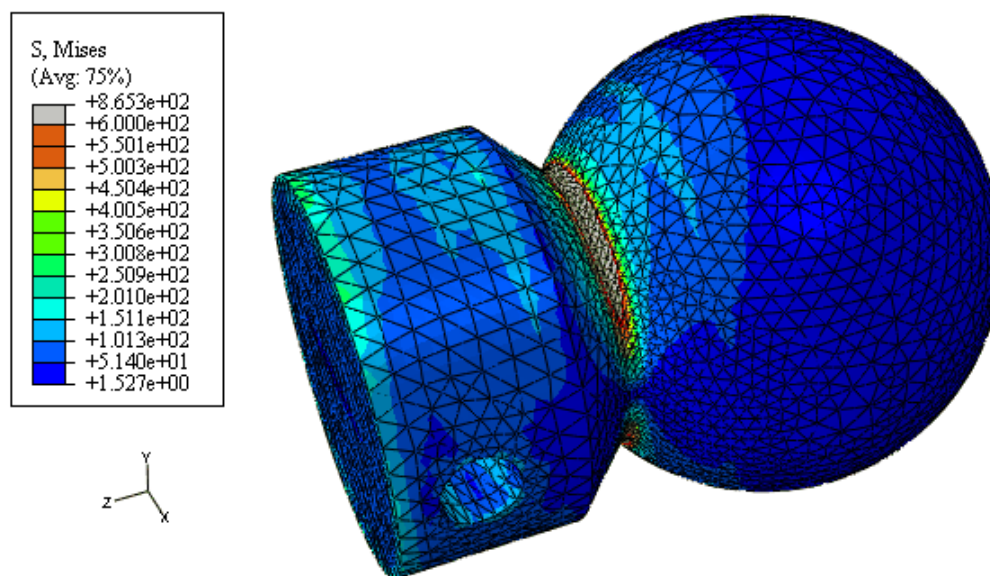
Iznos promjene ukupnih pomaka prema dijagramu sa slike 5.13 za 250 N iznosi 0.1 mm, za 500 N iznosi 0.225 mm, za 750 N iznosi 0.45 mm te za 1000 N promjena ukupnih pomaka iznosi 0.575 mm.

Pomak po osi z radi bolje usporedbe sa eksperimentom prikazan je na slici 5.12. Točka na gornjoj epruveti se za 250 N pomakne u smjeru osi z za 0.3 mm, u negativnom smjeru koji je prikazan u dijagramu na slici 5.12. Za 500 N ta se točka pomakne po z osi za 0.6 mm, za 750 N 0.9 mm te za maksimalnih 1000 N ta se točka pomakne 1.3 mm. Točka na donjoj epruveti se za 250 N pomakne 0.02 mm, također su svi pomaci u z-osi negativni, točka se kreće u negativnom smjeru osi z. Za opterećenje silom od 500 N točka na donjoj epruveti se pomakne za 0.04 mm, za 750 N se pomakne za 0.06 mm te za 1000 N se pomakne za 0.1 mm.



Slika 5.13 Pomak mjerene točke gornje i donje epruvete vanjskog fiksatora Orthofix za aksijalno opterećenje do 1000 N

Naprezanja koja se javljaju prilikom aksijalnog opterećenja najviše su koncentrirana na vratu kugle zgloba, te na mjestu dodira vijaka sa nosačem vijaka. Pri aksijalnom opterećenju od 1000 N maksimalni iznos naprezanja iznosi približno  $900 \text{ N/mm}^2$ , slika 5.14.



Slika 5.14 Naprezanja kugle vanjskog fiksatora Orthofix opterećenog aksijalno silom od 1000 N

Pošto je već pri 500 N naprezanje u medicinskom čeliku doseglo granicu elastičnosti, za očekivati je da će daljnjim povećanjem opterećenja materijal ući u plastično područje, što je izrazito nepogodno. Konstrukcija vanjskog fiksatora mora biti primjenjiva više puta, te niti jedan dio ne bi smio ući u plastično područje, jer bi se onda prečesto morali mijenjati dijelovi. Međutim u stvarnom slučaju to se neće dogoditi jer svi spojevi dijelova nisu idealno čvrsti te bi oni pri povećanju opterećenja počeli polagano popuštati, prije nego što bi došlo do nekih većih plastičnih deformacija. To popuštanje je pogodno, jer ti pomaci nisu veliki, ali su dovoljni da rasterete materijal. Isto tako pri korištenju vanjskog fiksatora ne bi se smjelo ići na opterećenja veća od 750 N, jer to nije taj tip vanjskog fiksatora, slika 5.15, za veća opterećenja. U provođenju računalnih simulacija i eksperimenta vanjski fiksator je opterećivan većim silama kako bi se ispitala njegova krutost pod kritičnim opterećenjima. Sa tim podacima o njegovom ponašanju u takvim uvjetima uspoređivanjem će se vidjeti u kojim granicama se nalazi model nove konstrukcije vanjskog fiksatora, te ako njegova stabilnost bude bolja, a krutost veća nego kod postojećeg *Orthofix-a*, to će potvrditi veću kvalitetu nove konstrukcije. Isto je tako važna udaljenost vanjskog fiksatora od epruveta. U ovom slučaju ta udaljenost je fiksna i iznosi 30 mm. Što je vanjski fiksator [16] bliže kosti to mu je stabilnost, a time i krutost veća. Ne preporuča se udaljenost veća od 40-50 mm.

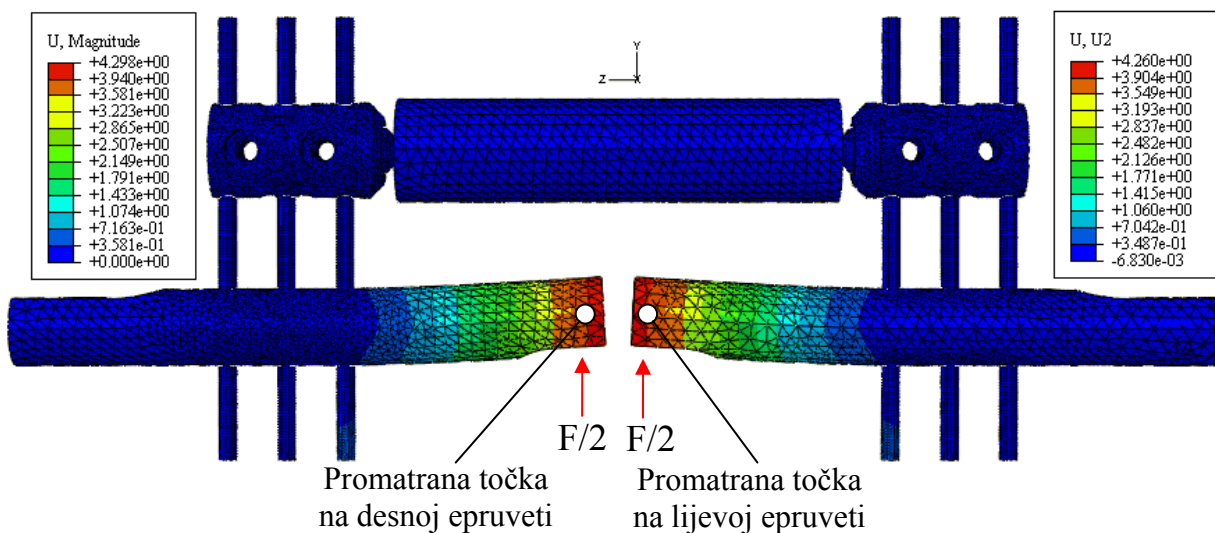
			10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
<b>Forearm</b>		<b>Ulna</b>	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	B	B
		<b>Radius</b>	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
		<b>Colles</b>	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
<b>Humerus</b>		<b>Simple/stable</b>	Y	Y	Y	B	B	B	B	B	B	B
		<b>Oblique/comminuted/unstable</b>	Y	Y	B	B	B	B	B	B	B	B
<b>Femur</b>		<b>Simple/stable</b>	Y	B	B	B	R	R	R	R	R	R
		<b>Oblique/comminuted/unstable</b>	Y	B	B	R	R	R	R	R	R	R
<b>Tibia</b>		<b>Simple/stable</b>	Y	Y	B	B	B	B	B	B	B	R
		<b>Oblique/comminuted/unstable</b>	Y	B	B	B	B	R	R	R	R	R

Slika 5.15 Pravilan odabir vanjskog fiksatora prema vrsti ozlijede i masi pacijenta (Tipovi fiksatora prema površinskoj boji: Y-Yellow, B-Blue, R-Red) [21]



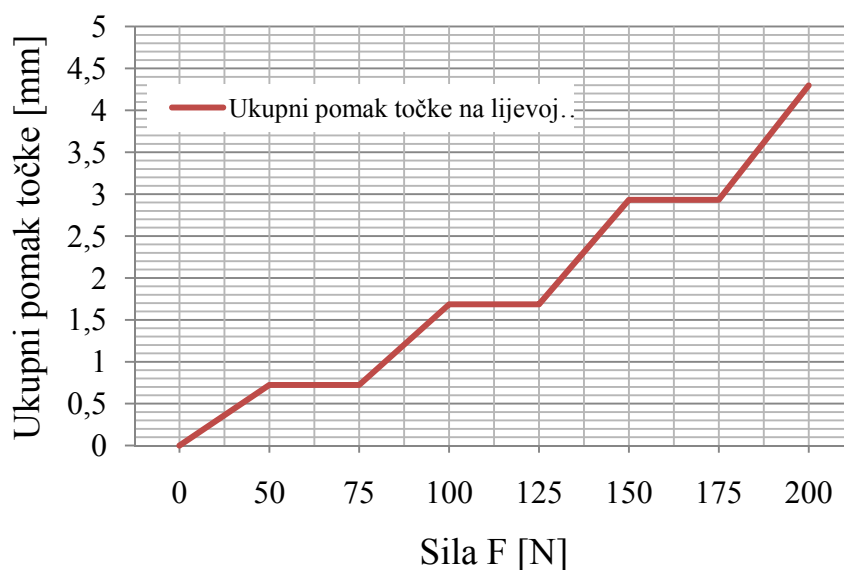
## 5.4 Rezultati dobiveni simulacijom savijanja vanjskog fiksatora *Orthofix*

Prema dobivenim rezultatima, slika 5.16, savijanjem vanjskog fiksatora *Orthofix* sa maksimalnom silom od 200 N dolazi do ukupnog pomaka promatranih točki na epruvetama od 4.298 mm.



Slika 5.16 Ukupni pomaci vanjskog fiksatora *Orthofix* za savojno opterećenje silom od 200 N

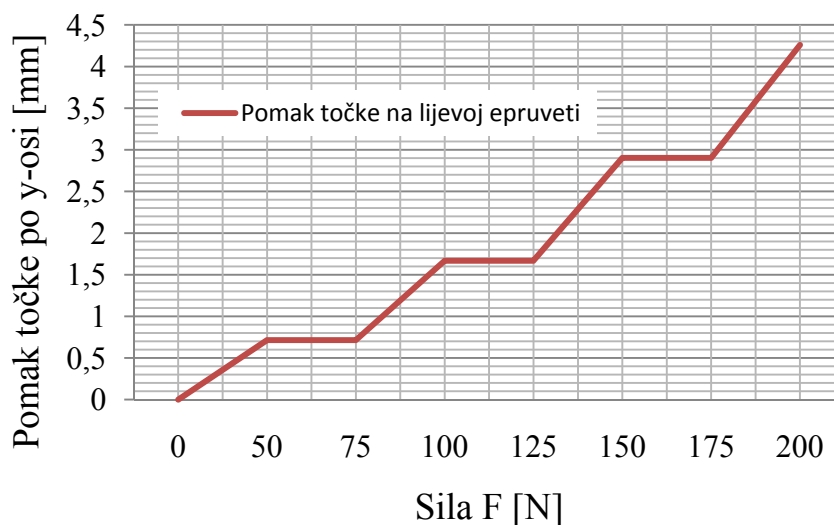
Na dijagramu sa slike 5.17 prikazani su ukupni pomaci za sve sile kojima se savojno opterećivao vanjski fiksator *Orthofix*.



Slika 5.17 Ukupni pomak točaka na epruvetama vanjskog fiksatora *Orthofix* za savojno opterećenje silom do 200 N

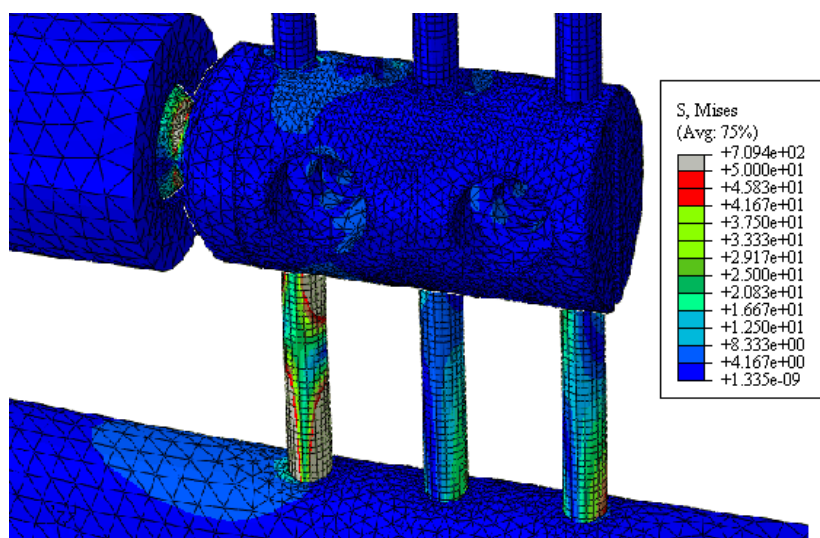
Ukupni pomak točke kod računalne simulacije savijanja vanjskog fiksatora *Orthofix* za opterećenje silom od 50 N iznosi 0.723 mm. Za opterećenje silom 100 N ukupni pomak iznosi 1.686 mm te za 150 N 2.933 mm.

Pomak točki po y-osi za *Orthofix* iznosi kod sile od 50 N 0.714 mm. Kod sile od 100 N taj pomak iznosi 1.667 mm, za 150 N iznosi 2.904 mm te za 200 N pomak uzduž osi y iznosi 4.26 mm, slika 5.18. Pošto je razlika u rezultatima za ukupni pomak i pomak uzduž osi y mala, tada se pomake u osima x i z može zanemariti.



Slika 5.18 Pomak mjenjenih točki na epruvetama vanjskog fiksatora *Orthofix* uzduž osi y pri savojnom opterećenju silom do 200 N

Sa slike 5.19 se vidi da naprezanja prelaze granicu elastičnosti materijala, te dolazi do trajnih plastičnih deformacija. Maksimalna naprezanja iznose preko  $700 \text{ N/mm}^2$ .

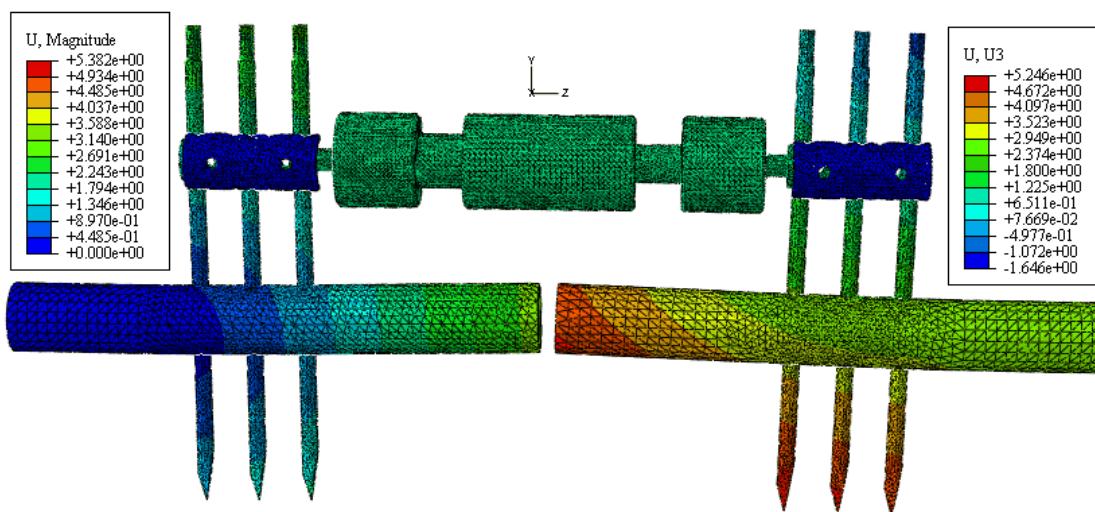


Slika 5.19 Ekvivalentna naprezanja po Misesu vijaka vanjskog fiksatora *Orthofix* opterećenog na savijanje silom od 200 N



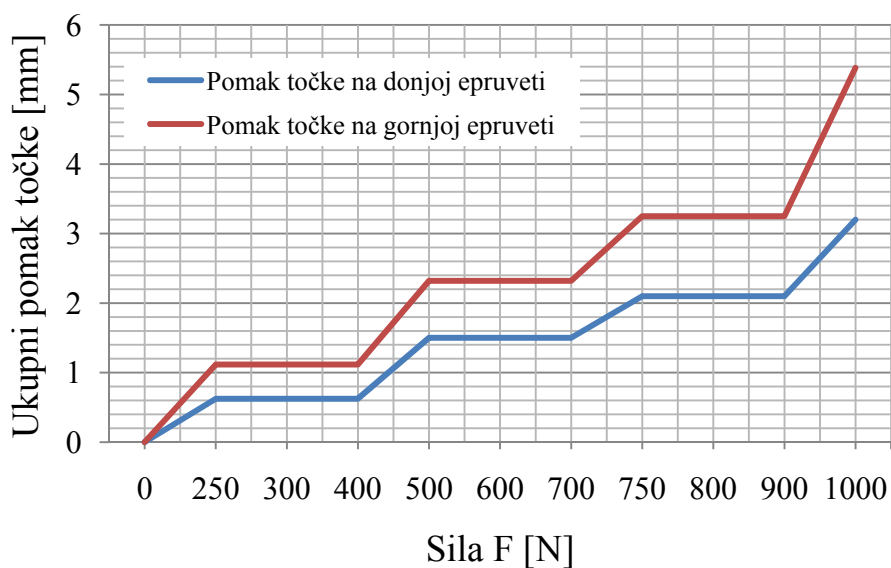
## 5.5 Rezultati dobiveni simulacijom aksijalnog opterećenja nove konstrukcije vanjskog fiksatora

Ukupni pomaci pri aksijalnom opterećenju nove konstrukcije vanjskog fiksatora silom od 1000 N iznose 5.382 mm, dok pomaci uzduž osi z iznose 5.246 mm. Promatrane točke nalaze se na istim mjestima kao i kod računalnih simulacija vanjskog fiksatora Orthofix, te geometrijski rubni uvjeti i opterećenja su također ista, slika 5.20.



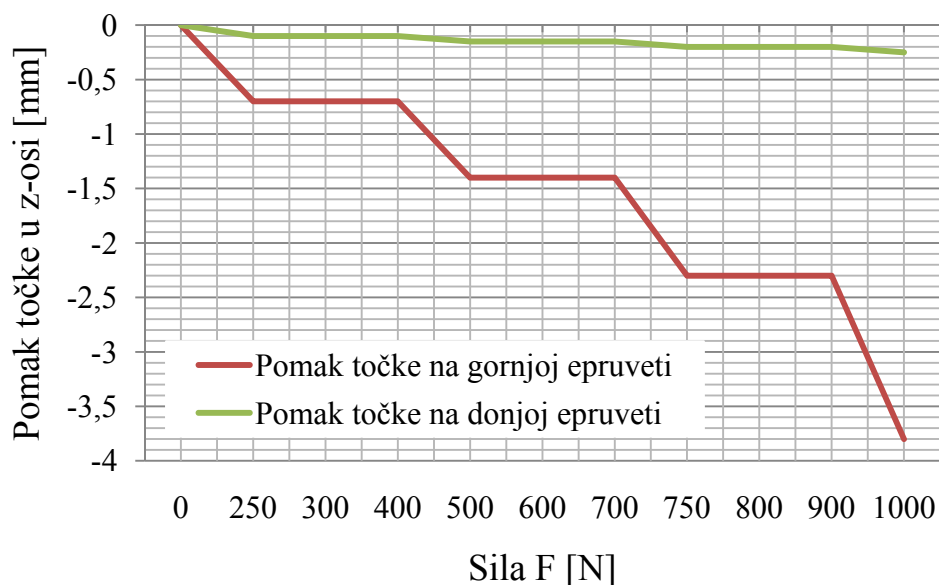
Slika 5.20 Ukupni pomaci (lijevo) te pomaci uzduž z-osi (desno) nove konstrukcije vanjskog fiksatora opterećene aksijalno silom od 1000 N

Ukupni pomaci točke na gornjoj epruveti iznose, za silu od 250 N, 1.12 mm. Za silu od 500 N isti pomak iznosi 2.32 mm, dok za 750 N iznosi 3.25 mm, slika 5.21.



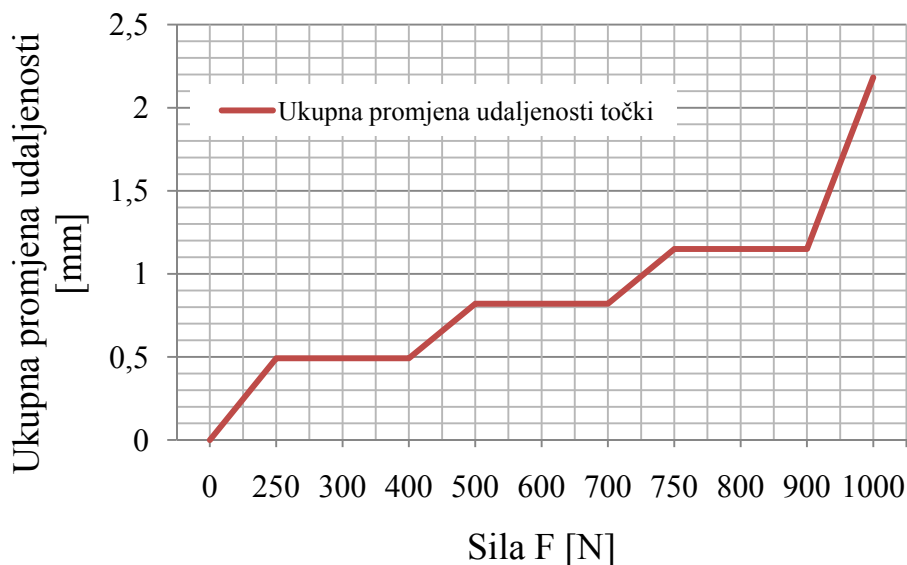
Slika 5.21 Ukupni pomak mjerenih točaka na epruvetama nove konstrukcije vanjskog fiksatora opterećenog aksijalno silom do 1000 N

Pomaci gornje točke po z-osi, za opterećenja silama od 250 N, 500 N, 750 N i 1000 N, iznose redom, u negativnom smjeru 0.7 mm, 1.4 mm, 2.3 mm te 3.8 mm. Pomaci donje točke iznose 0.1 mm, 0.15 mm, 0.2 mm te 0.25 mm, slika 5.22.



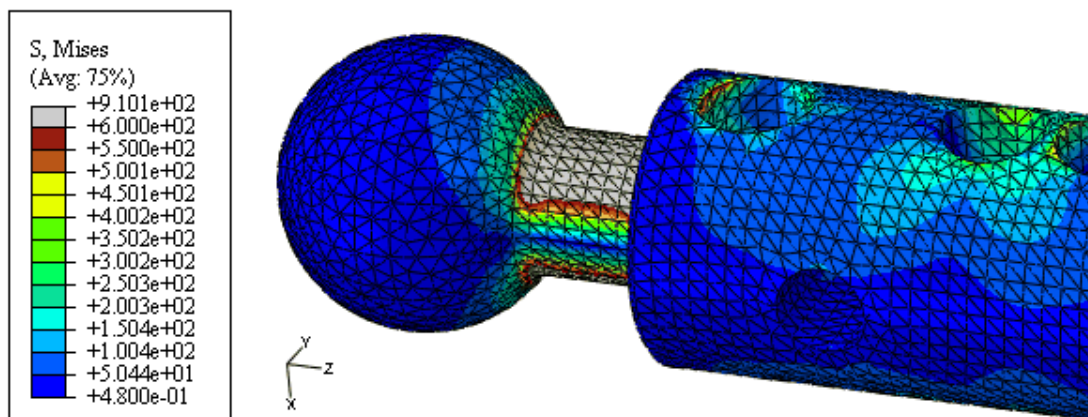
*Slika 5.22 Pomak mjerenih točaka na epruvetama nove konstrukcije vanjskog fiksatora u smjeru odi z pri aksijalnom opterećenju do 1000 N*

Promjena udaljenosti epruveta prema podacima za ukupni pomak iznosim, za 250 N, 0.492mm, za 500 N, 0.82 mm, za 750 N, 1.15 mm te za maksimalno opterećenje od 1000 N promjena udaljenosti epruveta iznosi 2.182 mm, dijagram sa slike 5.23.



*Slika 5.23 Ukupna promjena udaljenosti epruveta nove konstrukcije vanjskog fiksatora pri aksijalnom opterećenju do 1000 N*

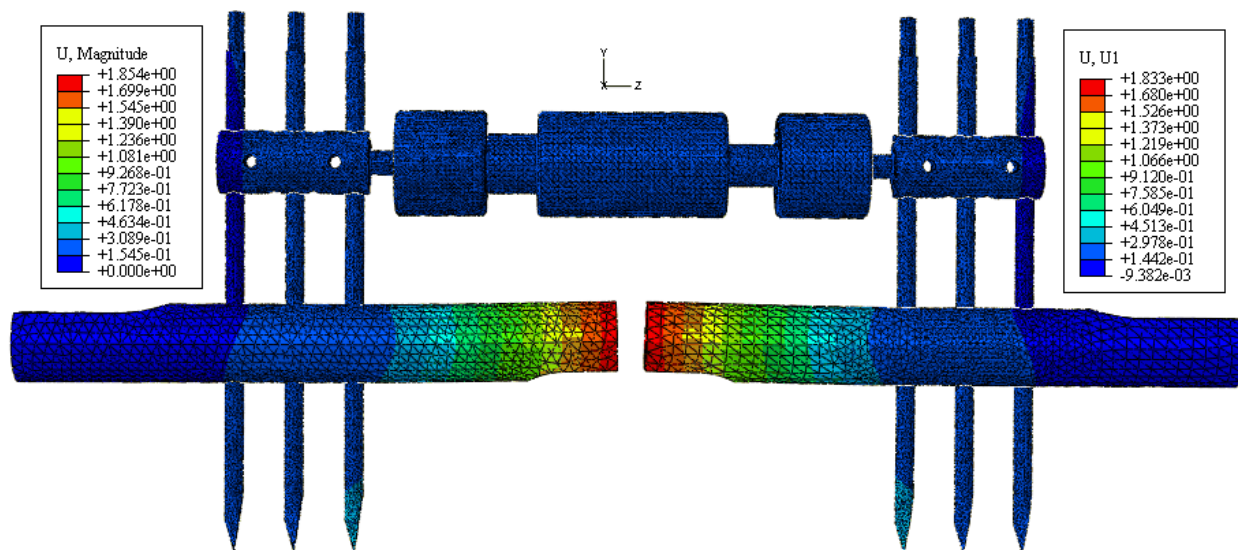
Maksimalna ekvivalentna naprezanja po Misesu iznose  $900 \text{ N/mm}^2$ , slika 5.24, i najveća su na vratu kugle zgloba. Kod nove konstrukcije, vrat kugle je dulji zbog toga da se osigura veći kut zakreta nosača vijaka te da se olakša montaža. To stvara probleme jer se produljenjem vrata kugle smanjila krutost konstrukcije, te su se povećali pomaci i naprezanja. Povećanjem presjeka vrata kugle zgloba osigurao bi se veći zakret nosača vijaka, ali bi se time i povećala krutost te smanjila opasnost od loma te velikih pomaka kod velikih opterećenja.



*Slika 5.24 Ekvivalentna naprezanja po Misesu nove konstrukcije vanjskog fiksatora opterećenog aksijalno silom od 1000 N*

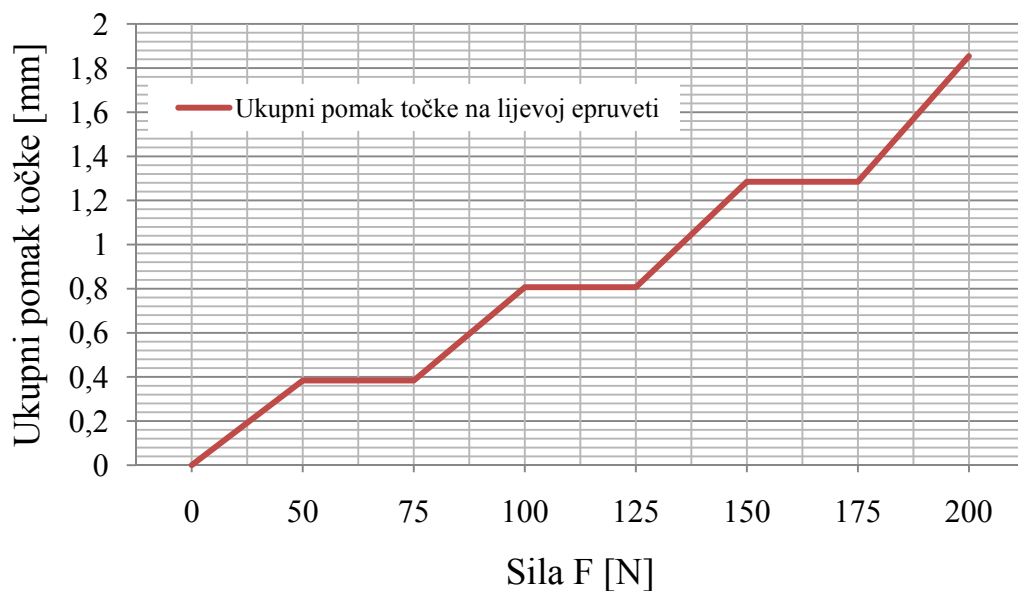
## 5.6 Rezultati dobiveni simulacijom savijanja nove konstrukcije vanjskog fiksatora

Kod nove konstrukcije se pri opterećenju savijanjem, slika 5.25, silom od 200 N javljaju ukupni pomaci od 1.854 mm.



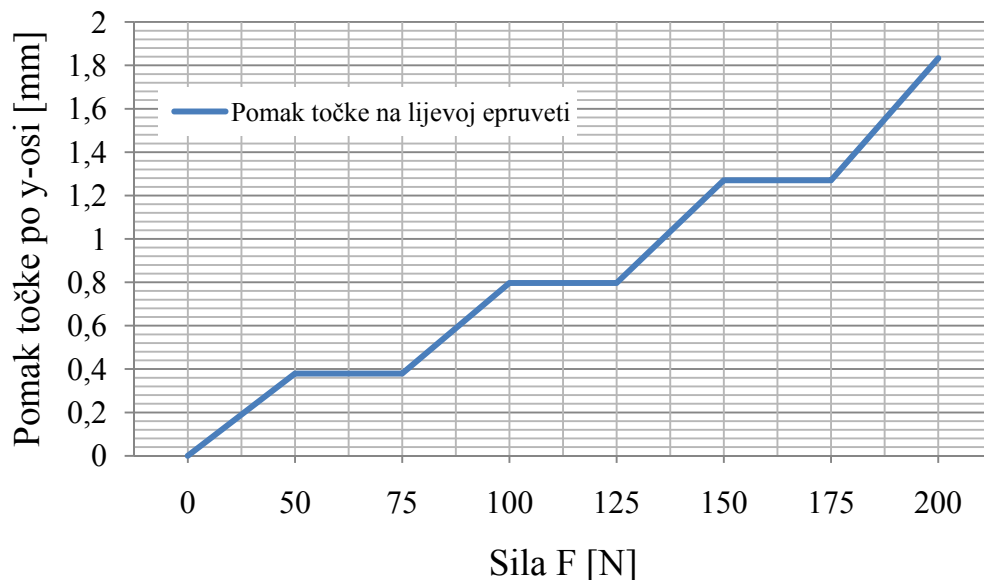
Slika 5.25 Ukupni pomaci (lijevo) te pomaci uzduž x-osi (desno) nove konstrukcije vanjskog fiksatora opterećene na savijanje silom od 200 N

Iz dijagrama sa slike 5.26 dobivenog iz programskog paketa *Aramis* može se očitati da je za silu 50 N ukupni pomak 0.3842 mm, za 100 N, 0.8067 mm te za 150 N, 1.285 mm.



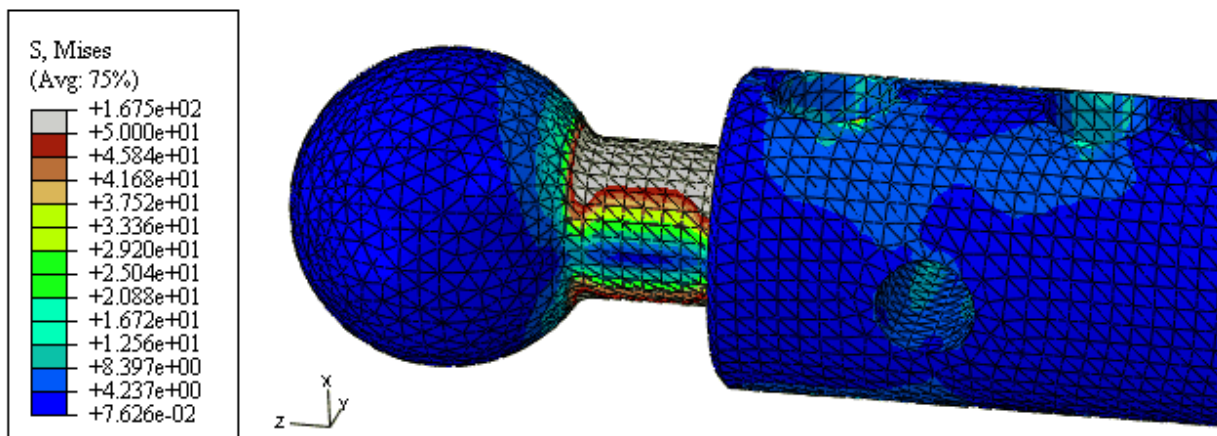
Slika 5.26 Ukupni pomak mjerenih točaka na epruvetama nove konstrukcije vanjskog fiksatora za savojno opterećenje silom do 200 N

Podaci za pomake točaka uzduž osi y, slika 5.27, iznose za opterećenja od 50 N, 100 N, 150 N i 200 N, redom 0.38 mm, 0.8 mm, 1.27 mm te 1.83 mm što pokazuje da se ne razlikuju previše sa ukupnim pomacima za ista opterećenja, te se da zaključiti da je utjecaj pomaka u smjeru x-osi i z-osi na ukupne pomake opet zanemariv.



Slika 5.27 Pomaci točaka na epruvetama nove konstrukcije vanjskog fiksatora za savojno opterećenje silom do 200 N

Kod savijanja nove konstrukcije vanjskog fiksatora javljaju se lokalna naprezanja koja su zanemariva, jer su ispod dopuštene granice za čelik. Ekvivalentna naprezanja po Misesu za savojno opterećenje silom od 200 N iznose  $170 \text{ N/mm}^2$ , slika 5.28.



Slika 5.28 Ekvivalentna naprezanja po misesu na vratu kugle zgloba nove konstrukcije vanjskog fiksatora opterećene savojno silom od 200 N

Tablica 1 prikazuje sve podatke dobivene eksperimentom i računalnom simulacijom kako bi se mogli lakše usporediti.

*Tablica 1 Prikaz svih rezultata dobivenih eksperimentalno i računalnom simulacijom*

	Ukupni pomak [mm]	Pomak u smjeru y-osi [mm]	Pomak u smjeru z-osi [mm]	Promjena udaljenosti $\Delta$ [mm]	Ekviv. naprezanja po Misesu [N/mm <sup>2</sup> ]
ESO 50 N	<b>0.45</b>	<b>-0.45</b>	-	-	-
ESO 100 N	<b>1</b>	<b>-1</b>	-	-	-
ESO 150 N	<b>1.7</b>	<b>-1.7</b>	-	-	-
ESO 200 N	<b>2.25</b>	<b>-2.5</b>	-	-	-
EAO 250 N	1.125	-0.8	-	0.7	-
EAO 500 N	2.250	-1.8	-	1.6	-
EAO 750 N	3.750	-2.8	-	2.7	-
EAO 1000 N	5.659	-4.04	-	3.8	-
SSO 50 N	<b>0.723</b>	<b>-0.714</b>	-	-	<b>100</b>
SSO 100 N	<b>1.686</b>	<b>-1.667</b>	-	-	<b>200</b>
SSO 150 N	<b>2.933</b>	<b>-2.904</b>	-	-	<b>608</b>
SSO 200 N	<b>4.290</b>	<b>-4.26</b>	-	-	<b>709</b>
SAO 250 N	0.375	-	-0.3	0.1	305
SAO 500 N	0.55	-	-0.6	0.225	614
SAO 750 N	0.825	-	-0.9	0.45	800
SAO 1000 N	1.2	-	1.3	0.575	950
SSK 50 N	<b>0.3842</b>	<b>0.3794</b>	-	-	<b>40.5</b>
SSK 100 N	<b>0.8067</b>	<b>0.7969</b>	-	-	<b>83.9</b>
SSK 150 N	<b>1.285</b>	<b>1.27</b>	-	-	<b>126</b>
SSK 200 N	<b>1.854</b>	<b>1.833</b>	-	-	<b>167</b>
SAK 250 N	0.625	-	-0.7	0.492	363
SAK 500 N	1.5	-	-1.4	0.82	718
SAK 750 N	2.1	-	-2.3	1.15	850
SAK 1000 N	3.2	-	-3.8	2.182	901

Kratice iz tablice 1:

- ESO – eksperiment savojnog opterećenja *Orthofix-a*,
- EAO – eksperiment aksijalnog opterećenja *Orthofix-a*,
- SSO – simulacija savojnog opterećenja *Orthofix-a*,
- SAO – simulacija aksijalnog opterećenja *Orthofix-a*,
- SSK – simulacija savojnog opterećenja nove konstrukcije,
- SAK – simulacija aksijalnog opterećenja nove konstrukcije,

## 6. Zaključak

U radu su opisana dva eksperimenta provedena na modelu vanjskog fiksatora *Orthofix* te četiri računalne simulacije provedene za oba modela vanjskih fiksatora, *Orthofix* te nove konstrukcije vanjskog fiksatora. Eksperimenti su provedeni na statičkoj kidalici te su snimani optičkim mjernim sustavom *Aramis*. U prvom eksperimentu vanjski fiksator je opterećen aksijalno silama od 250 do 1000 N, dok je u drugom eksperimentu opterećen savojno silama od 50 do 250 N. Paralelno sa eksperimentima provedena je i računalna simulacija istih načina i veličina opterećenja za vanjski fiksator *Orthofix* te novu konstrukciju vanjskog fiksatora. Dobiveni rezultati služe za verifikaciju nove konstrukcije, kako bi se, ukoliko zadovoljava funkcionalne i konstrukcijske zahtjeve, mogao napraviti prototip nove konstrukcije vanjskog fiksatora za detaljnija ispitivanja.

Računalnom simulacijom dobiveni rezultati za aksijalno opterećenje pokazuju, kako za vanjski fiksator *Orthofix* tako i za novu konstrukciju vanjskog fiksatora, da se kod velikih opterećenja na nekim mjestima pojavljuju lokalna naprezanja koja su veća od dopuštenih, te prelaze granicu elastičnosti materijala od kojih su ti dijelovi konstrukcije napravljeni. Plastične deformacije, nepovoljne za trajno korištenje uređaja, uzrok su tome što su modeli pripremljeni za računalnu simulaciju pojednostavljeni, te su kontakti između dijelova idealno čvrsti. Tako definirani modeli ne dopuštaju lokalna proklizavanja u zglobnim spojevima konstrukcije pri velikim opterećenjima pa ne postoji mogućnost rasterećenja tih dijelova. Pomaci koji se pritom javljaju istog su karaktera, i nema velikih odstupanja što znači da su rezultati usporedivi. Nešto veći pomak kod nove konstrukcije vanjskog fiksatora pri aksijalnom opterećenju posljedica je dužeg vrata kugle zgloba, čime se smanjila krutost konstrukcije ali se omogućio veći kut zakreta nosača vijaka. Veći kut zakreta nosača vijaka znači i lakša montaža vanjskog fiksatora te lakši pristup kompleksnijim ozljedama. Kada se rezultate aksijalnog opterećenja nove i postojeće konstrukcije vanjskog fiksatora dobivene računalnom simulacijom usporedi s rezultatima dobivenim provedbom eksperimenta, može se zaključiti da nova konstrukcija što se tiče ovog načina opterećivanja, uz neke manje konstrukcijske promjene u potpunosti zadovoljava.

Kod savojnog načina opterećenja postoje neke manja odstupanja u rezultatima, no tome je razlog što postojeća konstrukcija ima većinu dijelova napravljenih od aluminija dok je nova konstrukcija u potpunosti napravljena od medicinskog čelika. Samim time što je aluminij kao materijal manje specifične težine, ali izraženije elastične karakteristike, pomaci su kod postojeće konstrukcije prilikom savojnog opterećenja veći. Naprezanja koja se javljaju kod savijanja su ispod granice dopuštenih, te ne dovode u pitanje čvrstoću konstrukcije.

Nužne konstrukcijske izmjene nove konstrukcije vanjskog fiksatora će kod većih opterećenja smanjiti pojavu lokalnih naprezanja koja su kod postojeće konstrukcijske izvedbe veća od dopuštenih, te će povećati krutost konstrukcije, a neće loše utjecati na funkcionalne zahtjeve brze i jednostavne montaže i osiguranja dostatne stabilnosti koštanih ulomaka.

## 7. Literatura

- [1] Hančević J. i sur., Lomovi i isčašenja, Naklada Slap, Jastrebarsko, 1998., 89-96
- [2] Brcelj B., Ratna kirurgija, Sanitetska uprava JNA, Beograd, 1953., 5-14
- [3] Tscherne H., The management of open fractures. U: Tscherne H, Gotzen L, Fractures with soft tissue injuries. Springer, Berlin, 1984, 1-162
- [4] Russell A.T., General principles of fracture treatment. U: Crenshaw A.H., Campbell's
- [5] Maričević A., Vanjski fiksator u liječenju ratnih ozlijeđa donjih udova, Doktorska dizertacija, Sveučilište u Rijeci, Medicinski fakultet, 2001., 8-14
- [6] Rukavina, Osteosinteze dugih kostiju, Naklada Slap, 1999.
- [7] Epari D.R., Kassi J.P., Schell H., Duda G.N., Timely Fracture-Healing Requires Optimization of Axial Fixation Stability, The Journal of Bone and Joint Surgery, Incorporated, 2007, 89, 1575-1585
- [8] Giotakis N., Narayan B., Stability with unilateral external fixation in the tibia, Strat Traum Limb Recon, 2007., 2, 13-20
- [9] Franz M., Ispitivanje mehaničkih i tehnoloških svojstava materijala, IP4, Školska knjiga, Zagreb, 1998.
- [10] Sorić J., Metoda konačnih elemenata, Golden marketing-tehnička knjiga, Zagreb, 2004.
- [11] Marenic, E., Semestralni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, 2007.
- [12] Programski paket *Abaqus 6.9-1*, *Abaqus documentation*.
- [13] [www.topomatika.hr](http://www.topomatika.hr)
- [14] Aramis User Manual – Software, GOM mbH, Njemačka 2009
- [15] Aramis User Information – Hardware, GOM mbH, Njemačka 2009
- [16] Moss, Nirmal, Tejwani, Biomechanics of External Fixation, Bulletin of the NYU Hospital for Joint Diseases, 2007.
- [17] Drvar N., Optički postupak digitalizacije oblika projiciranjem kodiranog svjetla, Doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2007.
- [18] Beraldin J.A. i sur., *Active 3D Sensing*, Modelli E Metodi per lo studio e la conservazione dell'architettura storica, NRC 44159, pp 22-46, 2000.
- [19] Forsyth D., Ponce J., *Computer Vision: A Modern Approach*, Prentice Hall, 2003.
- [20] Hannu T.A., Todd J.H., Edmund Y.S.C., Mechanical Characteristics of an Upper-Extremity External Fixator, Biomechanics Laboratory, Department of Orthopedics, 1988, 253, 240-250
- [21] Stryker Monotube Triax, katalog, Unilateral External Fixation, Švicarska, 2006.